

Meteorologie des Gewitters

Von Hans Israël, Aachen*)

DK 551.594.21

Vorbemerkungen

Das Gewitter stellt zwar nur ein verhältnismäßig kleines Teilstück im atmosphärischen Energieumsatz des Wetters dar. Trotzdem kommt dieser Wetterphase im Rahmen des Ganzen eine besondere Bedeutung zu wegen der sie begleitenden elektrischen Entladungserscheinungen.

Dieses Begleitphänomen hat von jeher das Gewitter an bevorzugte Stelle der Naturbetrachtung gerückt und — zunächst aus dem Streben nach Schutz vor den mit ihm verbundenen Gefahren — schon frühzeitig in der Entwicklung der modernen Naturwissenschaften zur näheren Erforschung angeregt. Man denke nur an *Benjamin Franklin* und die von ihm stammenden und bis heute gültigen Maßnahmen für den Blitzschutz.

Darüber hinaus haben bald weitere Teil- und Begleiterscheinungen des Gewitters das Interesse der Geophysiker und Meteorologen gefunden. Der mit atmosphärischen Problemen beschäftigte Physiker sieht im Gewitter Ursprung und Steuerung der atmosphärisch-elektrischen Erscheinungen und fragt nach Art und Wirkungsweise dieses atmosphärischen Generators. Die Turbulenzforschung betrachtet das Gewitter als wesentliches Teilphänomen des atmosphärischen Luftmassenaustausches. In der drahtlosen Telegraphie erscheinen Gewitterwirkungen als Störungen. Der beratende Meteorologe ist bestrebt, Gewitter und Starkniederschläge vorherzusagen, der Bauingenieur strebt nach möglichst wirksamem Blitzschutz usw.

Das heutige Interesse am Gewitter ist vor allem auf die drei folgenden Hauptprobleme gerichtet:

1. das Gewitter als meteorologisch-elektrisches Phänomen,
2. das Gewitter als Sender,
3. das Gewitter als Gefahrenquelle.

Im folgenden sind im wesentlichen Einzelfragen der ersten Problemgruppe dargestellt und einige praktische Fragen der zweiten Gruppe behandelt. Die dritte Gruppe wird in den späteren Beiträgen dieses und des nächsten Heftes besprochen.

Das Gewitter als meteorologisch-elektrisches Phänomen

Verbreitung und Häufigkeit der Gewitter

Wenn man die allgemeine Frage: „Was ist ein Gewitter?“ beantworten will, so muß man seine Stellung im Rahmen des Wetters betrachten. Zu diesem Zweck sei zunächst die Beobachtungsstatistik befragt: „Wann, wo und unter welchen Bedingungen kommen Gewitter vor?“

Am häufigsten sind Gewitter in den Tropen, den Gebieten der größten Niederschlagsmengen. Mit zunehmender Breite nimmt ihre Häufigkeit allmählich ab; in den Polargebieten kommen praktisch keine Gewitter vor. In der äquatornahen Zone kann man im Mittel 100 bis 150 Ge-

wittertage im Jahr annehmen, in den mittleren Breiten etwa 15 bis 50, in der Nähe der Polarkreise vielleicht noch 1 bis 2. Die nördliche bzw. südliche Grenze regelmäßigen Gewittervorkommens scheint in großen Zügen mit der Packeisgrenze übereinzustimmen, also in etwa 70 bis 80° nördlicher und 50 bis 60° südlicher Breite zu liegen.

Diese allgemeine Breitenabhängigkeit wird zunächst durch die Land-See-Verteilung modifiziert. Über dem Festland ist die Gewitterhäufigkeit wesentlich größer als über den Ozeanen, wie aus der in Bild 1 wiedergegebenen Weltgewitterkarte deutlich hervorgeht. Die innerhalb der Landgebiete zu erkennenden Unterschiede hängen mit der orographischen Gliederung der Landoberfläche zusammen. Von der Küste nimmt die Gewitterwahrscheinlichkeit zum Landesinneren hin zu und erreicht im allgemeinen mit der Annäherung an Gebirge ihre Höchstwerte.

Schließlich lassen sich bei noch feinerer Auflösung Einflüsse des Untergrundes erkennen, in denen sich unter Umständen Seen, Sumpfgebiete, Uferlinien und andere Landschaftsunterschiede abzeichnen. Bild 2 zeigt als Beispiel hierfür die Blitzeinschlaghäufigkeit in Südwest-Schweden. Man erkennt die „Ausparung“ des Väner-Sees und des (kleineren) Vätter-Sees, die Ufer- und Hügelseinflüsse und die Abnahme zur Skagerrak-Küste hin.

Bild 3 enthält Ergebnisse von Blitzzählungen während einer ungewöhnlich gewitterreichen Wetterlage in Nord-Schweden. Durch die dicke gestrichelte Linie ist die östliche bzw. südöstliche Begrenzung der Labilitätszone gekennzeichnet. Nach der meteorologischen Beurteilung handelte es sich um eine von Ost nach West vorrückende Warmfront, in deren präfrontalem Bereich die Gewitter ausgelöst wurden.

Die Wahrscheinlichkeit der Gewitterbildung schwankt in charakteristischer Weise im Verlauf eines Tages und Jahres. Die größte Wahrscheinlichkeit für das Aufkommen eines Gewitters besteht, wie allgemein bekannt, im Inland in den Nachmittagsstunden und im Hochsommer. Das sommerliche Maximum löst sich bei feiner zeitlicher Unterteilung in zwei Maxima auf, von denen das erste auf etwa Anfang Juni, das zweite auf etwa Mitte bis Ende Juli fällt. Die Zweiteilung läßt sich leicht aus dem mittleren jährlichen Witterungsverlauf in Mitteleuropa begründen.

Über See und zum Teil auch im Küstengebiet liegen die Verhältnisse meist insofern anders, als man dort vielfach ein nächtliches Maximum sowie die Neigung zu spätherbstlichen und winterlichen Gewittern findet. Periodisch wiederkehrende zeitliche Schwankungen der Gewittertätigkeit, wie z.B. eine gewisse Beziehung zur Sonnenaktivität, sind nur sehr schwach ausgeprägt.

Die Gewitter zeigen im allgemeinen eine fortschreitende Bewegung. Diese Richtung der Bewegung entspricht dabei meist der der oberen Luftströmungen, kann also, wie es auch häufig beobachtet wird, der Windrichtung am Boden entgegengesetzt sein. Man kann im allgemeinen die Richtung der Fortentwicklung eines Gewitters mit ziem-

*) Prof. Dr. phil. Dr. phil. nat. habil. H. Israël ist Leiter des Meteorologischen Observatoriums Aachen des Deutschen Wetterdienstes und Professor an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

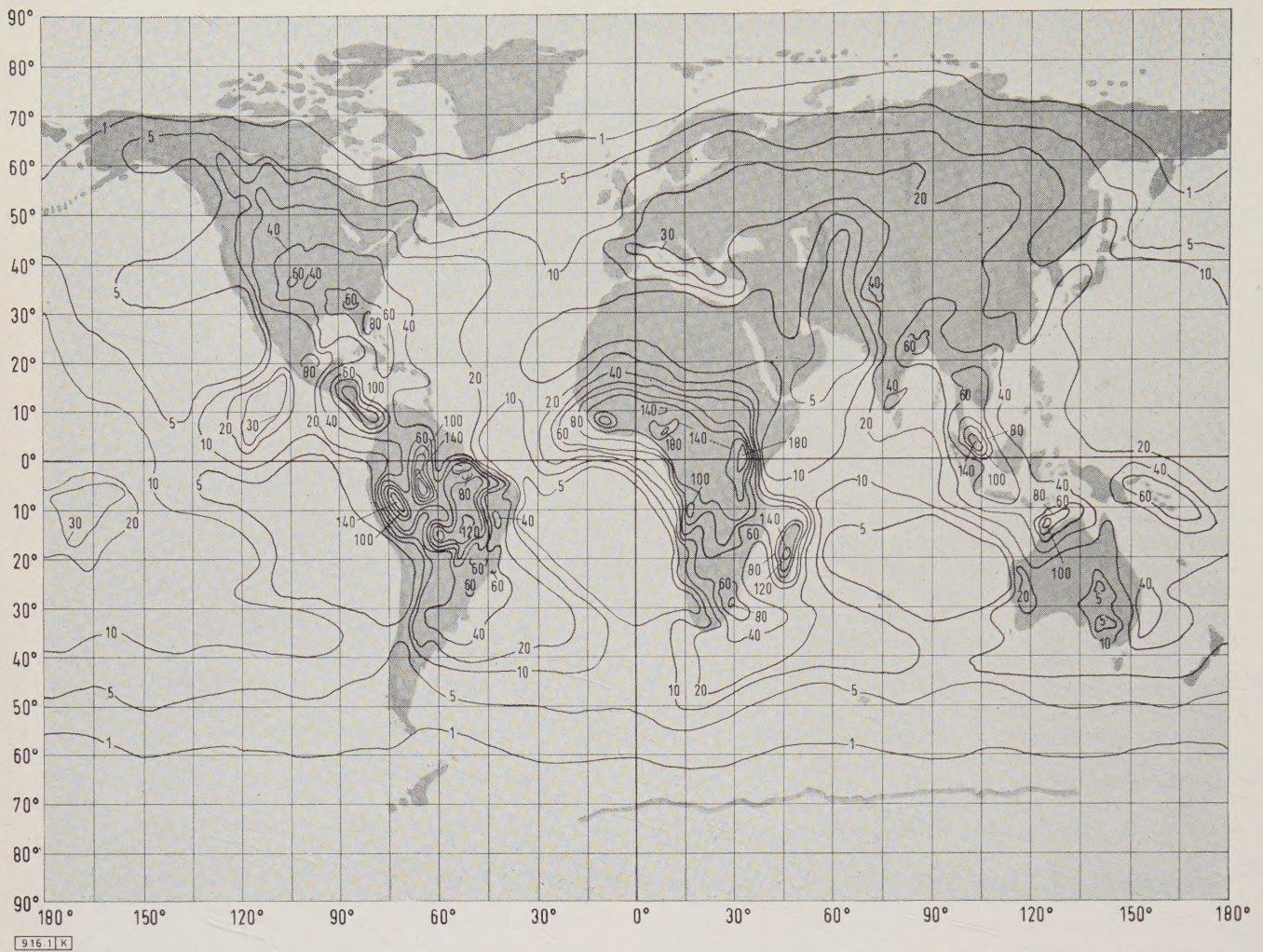


Bild 1. Karte der Weltgewittertätigkeit [1].

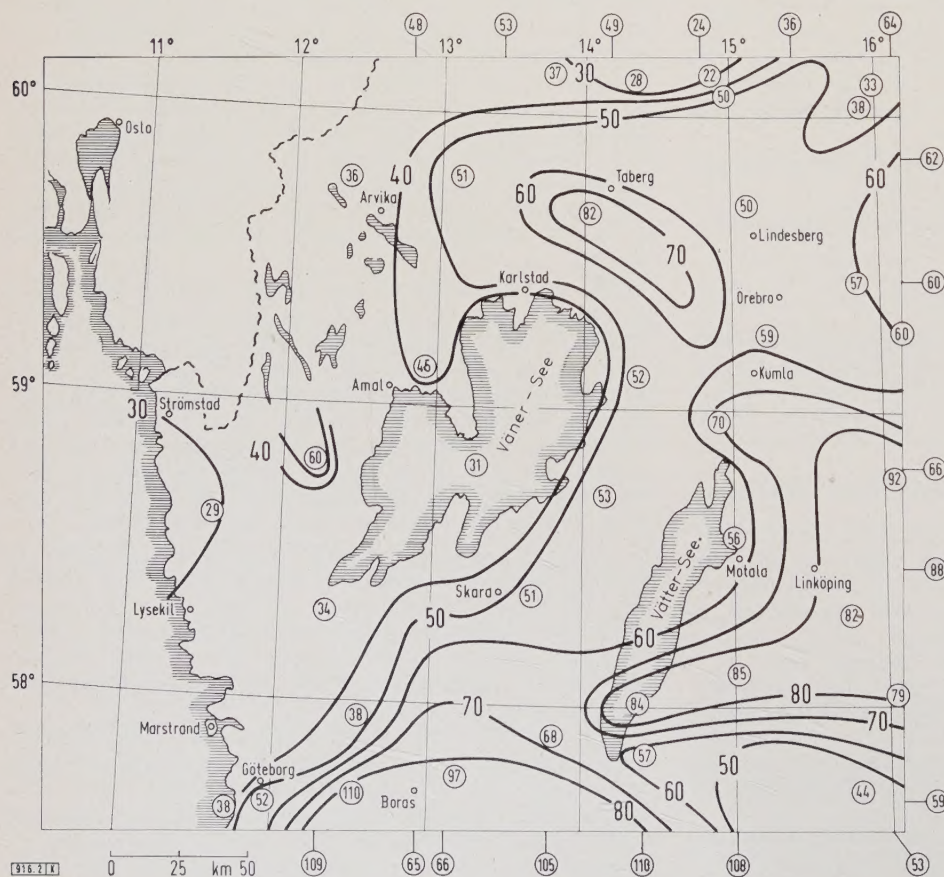
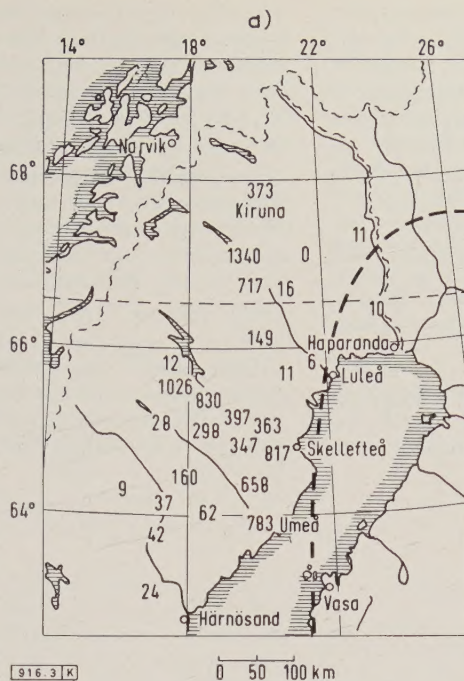


Bild 2. Anzahl der Erdblitzes je 100 km² und Jahr in Südwest-Schweden. Mittelwerte aus dreijährigen Berechnungen mittels Blitzzähler. Die Kreise kennzeichnen die Lage der einzelnen Meßstellen. (Bild von Prof. Dr.-Ing. D. Müller-Hillebrand, Uppsala, zur Verfügung gestellt.)

Bild 3. Übersicht über die Ergebnisse von Gewitterzählungen am 28. Juli 1960 in Nordschweden. (Bilder von Prof. Dr.-Ing. D. Müller-Hillebrand, Uppsala, zur Verfügung gestellt.)

- a) Anzahl der von 1.00 bis 23.00 Uhr von den Blitzzählern aufgenommenen Impulse,
b) im gleichen Zeitraum von den Beobachtungsstationen gemeldete Gewitter (gekennzeichnet durch Gewittersymbole).



licher Sicherheit aus dem ihm meist voranziehenden „Gewitterschirm“ ersehen.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gewitter wechselt je nach den Umständen innerhalb weiter Grenzen. Im Gebirge können lokale Nachmittagsgewitter, die sich über den Bergen gebildet haben, stundenlang fast ohne Bewegung stehenbleiben. Andererseits kommen bei großen Kaltlufteinbrüchen Zuggeschwindigkeiten der Gewitterfront bis zu 100 km/h vor.

Mechanismus der Gewitterbildung

Das Gewitter stellt die letzte Steigerung der Wettererscheinungen dar, die mit vertikalen Aufwärtsbewegungen feuchter Luft verknüpft sind.

Aufwind kann auf verschiedene Weise entstehen. Werden z.B. im Sommer durch die Wärmeeinstrahlung der Sonne die bodennahen Luftschichten stark aufgeheizt, so führt dies zu einer Änderung in der atmosphärischen Schichtung. Die unteren Luftschichten dehnen sich bei der Erwärmung aus, werden dadurch spezifisch leichter als die über ihnen lagernden Schichten und suchen aufzusteigen. Es bilden sich die bekannten Turbulenzerscheinungen, bei denen einzelne erwärmte Luftballen von unten nach oben bewegt und durch absinkende kühlere Luftballen aus der Höhe ersetzt werden. Diese Turbulenz formt sich schließlich in einzelne „Aufwindschläuche“ um, wie sie der Segelflieger kennt und benutzt. Meist werden diese Aufwindgebiete dadurch kenntlich, daß ihre obersten Teile als Cumulus- (Haufen-) Wolken sichtbar werden. Diese auch als „Schönwetter-Cumuli“ bezeichnete Konvektionsbewölkung ist, wie schon ihr Name besagt, häufig eine regelmäßige Begleiterscheinung schönen und beständigen Sommerwetters. Andere Möglichkeiten der Aufwinderzeugung sind die, daß die Luft beim Überströmen ansteigenden Geländes angehoben wird, oder daß sich — bei einem sogenannten „Kaltlufteinbruch“ — kühlere Luft unter die wärmere schiebt und diese zum Aufsteigen zwingt.

Feuchtigkeit ist die zweite Voraussetzung für Gewitterbildung. Sie kann durch die mit der Temperatur ansteigende Verdunstung von unten her oder durch Zufuhr feuchter Luft von der Seite her in Bodennähe auf das erforderliche Maß ansteigen. Wird die bodennahe Luft durch einen der obengenannten Vorgänge zum Aufsteigen gezwungen, so kühlt sie sich ab und erreicht in einer bestimmten Höhe eine Temperatur, bei der sie gerade mit

Wasserdampf gesättigt ist. Weiteres Aufsteigen hat dann Kondensation (Wolkenbildung) zur Folge. Die dabei frei werdende Kondensationswärme verlangsamt die weitere Abkühlung der aufsteigenden Luft; dadurch wird diese wiederum spezifisch leichter als ihre Umgebung und erhält damit erneut Auftrieb. Dieser sogenannte „feucht-labile“ Zustand klingt bei geringem Wasserdampfgehalt der Luft mit zunehmender Höhe rasch ab; bei hoher Ausgangsfeuchtigkeit dagegen läßt er die mächtig aufgetürmten Quellwolken entstehen, welche die Gewitterbildung einleiten.

Das feucht-labile Aufsteigen endet meist in 6 bis 8 km Höhe mit der Ausbildung des sogenannten „Gewitterschirmes“ (Bild 4a), eines diffusen, in der Regel unsymmetrisch angeordneten Wolkenschleiers über dem Quellwolkengebiet. Er entsteht durch das Auseinanderfließen von Kaltluft über den Gewittergipfel, der hier durch die Höhenströmung einseitig verzerrt wird (Bild 4b).

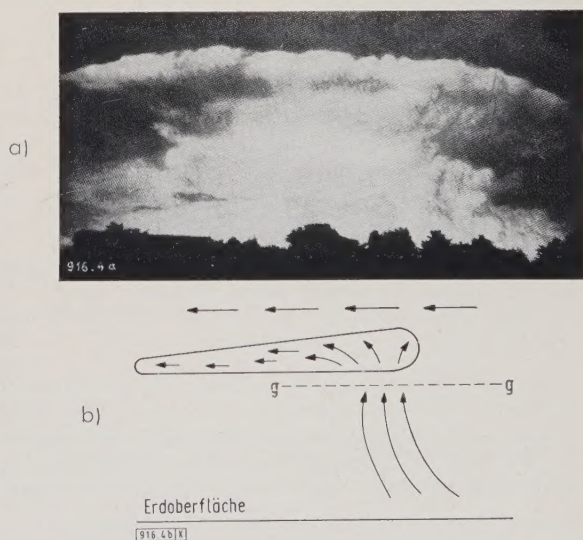


Bild 4. Gewitterschirm und Erläuterung der Schirmbildung.

- a) Gewitterschirm während eines Gewitters über Südwürttemberg am Spätnachmittag des 4. Juni 1953, aus 30 km Entfernung aufgenommen von H. W. Kasemir, Buchau a. F.,
b) Schema der Schirmbildung nach H. v. Ficker. g-g deutet das Gleichgewichtsniveau an, in dem die aufsteigende Luft gleiches spezifische Gewicht hat wie ihre Umgebung.

Wird beim feucht-labilen Aufgleiten der Luft die 0° -Grenze der Temperatur erreicht und unterschritten, so beginnt das flüssige Wasser der Wolkentröpfchen zu gefrieren. Damit ist ein Punkt von entscheidender Bedeutung in der Entwicklung erreicht. Denn mit der Eisbildung in den Wolken, die sich dem Beobachter durch den Übergang der ursprünglich scharfen oberen Wolkenränder in unscharfe schleier- oder kappenförmige Formen anzeigt, beginnt — wie man aus Erfahrung weiß — eine Reihe von Prozessen wirksam zu werden, die sowohl für die Elektrizitätsausbildung großen Ausmaßes als auch für die Bildung von Starkniederschlag verantwortlich sind. Es entstehen Niederschlagsteilchen in flüssiger (Regen) und fester Gestalt (Schnee, Graupeln und eventuell Hagel).

Nach umfangreichen amerikanischen Gewitteruntersuchungen [2] baut sich ein Gewitter in der Regel aus einigen Zellen von wenigen Kilometern Durchmesser auf,

bremsen diesen durch Reibung ab und verwandeln ihn gebietsweise sogar in Fallwind. Diese Umwandlung beginnt in der 0° -Grenze und breitet sich von dort aus in vertikaler und horizontaler Richtung aus. Die größten Fallwindbeträge werden in der Wolkenbasis beobachtet. Die Beträge der Vertikalbewegungen können bis zu 30 m/s reichen.

Die ständig wachsende Niederschlagsmenge verläßt den Wolkenbereich und fällt als Starkniederschlag zur Erde. Gleichzeitig damit erfolgt in Fortsetzung des Fallwindes im Zelleninneren ein Kaltluftausbruch aus der Zelle nach unten, der sich mit der Annäherung an den Boden seitlich ausbreitet und hier die typischen Gewitter-Sturmböen veranlaßt.

Der Ausfall des Niederschlages aus der Zellenbasis unterbindet in fortschreitendem Maße den Aufwind und verwandelt ihn schließlich in der ganzen Zelle in Abwind. Damit hört die Zufuhr neuer Energie auf. Die Zelle beginnt

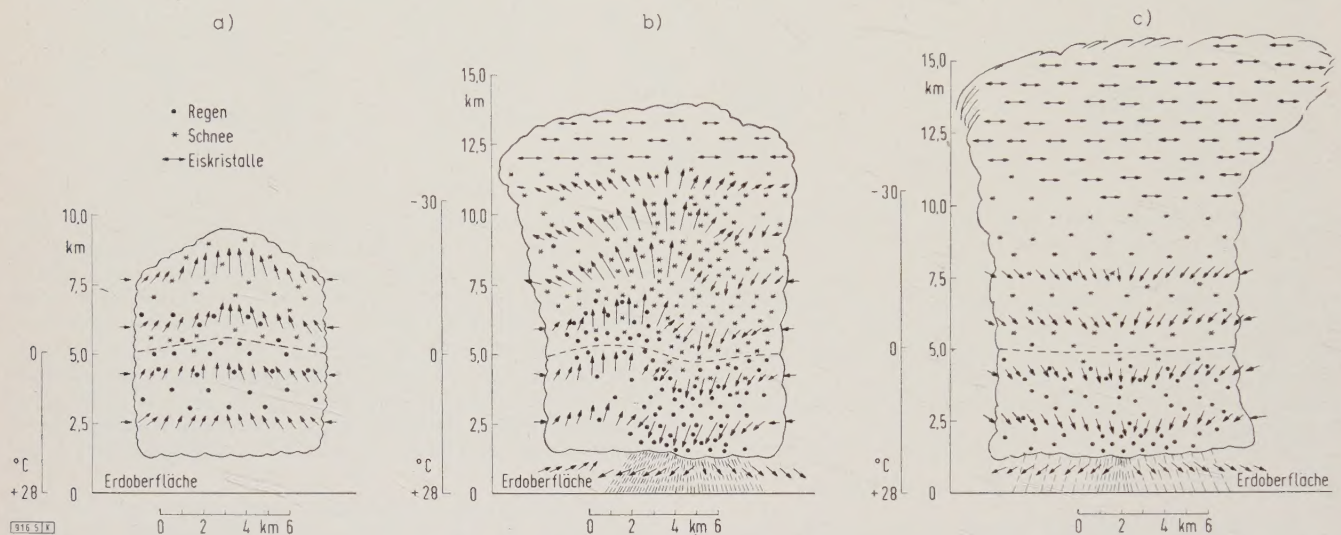


Bild 5. Die drei Stadien eines sich bildenden Gewitters in schematischer Darstellung (Vertikalschnitte durch eine Gewitterzelle); die gestrichelte Linie ist die Nullgradgrenze.

a) Jugendstadium, b) Reifestadium, c) Altersstadium.

deren jede eine charakteristische Entwicklung durchläuft. Man kann danach drei typische Stadien unterscheiden: „Jugendstadium“, „Reifestadium“ und „Altersstadium“.

Im Jugendstadium stellt die Zelle einen Quell-Cumulus dar. In diesem Stadium herrscht im ganzen Bereich Aufwind; dieser ist nicht gleichmäßig über die Zelle verteilt, sondern nimmt von unten nach oben und von den seitlichen Zellenrändern zur Mitte hin etwa nach der in Bild 5 a durch Pfeile angedeuteten Verteilung zu.

Die Bildung von Niederschlagsteilchen ist in diesem Stadium noch gering. Die Dauer dieses Stadiums hängt von der Stärke des Quellvorganges ab und läßt sich im Durchschnitt auf etwa 10 bis 15 min schätzen.

Im Reifestadium wird die weitere Entwicklung der Zelle durch die Niederschlagsbildung bestimmt. Die Zelle wächst unter der Wirkung der „Feucht-Labilität“ weiter, scheidet dabei laufend Wasserdampf durch Kondensation und Sublimation ab und nährt damit die Niederschlagsbildung.

Zunächst werden die Niederschlagsteilchen vom Aufwind getragen. Mit zunehmender Menge und Größe beginnen sie dann aber mehr und mehr gegen den Aufwind zu fallen. Diese Niederschlagsbewegung gestaltet dann die Strömung und Temperaturverteilung in der Zelle um (Bild 5 b). Die gegen den Aufwind fallenden Teilchen

abzusterben. Die Zeitdauer dieses Reifestadiums beträgt etwa 15 bis 30 min.

Im Altersstadium ist jeder Aufwind abgestorben (Bild 5 c). Der in der Zelle noch enthaltene Niederschlag fällt allmählich aus. Die mittlere Dauer dieses Stadiums beträgt etwa 30 min.

Das Gewitter ist danach kein in sich geschlossenes Gebilde, das mit der Luftströmung „weiterzieht“, sondern es entwickelt sich in der Weise fort, daß es an seiner Stirnseite durch Aufwind neue „Nahrung“ (Energiezufuhr) erhält. Die Fortentwicklung besteht dann im Anbau immer neuer Zellen an der Stirnseite. Dabei kann der aus einer absterbenden Zelle ausfließende Fallwind als Anstoß für die Bildung der Aufwindschläuche in der Nachbarschaft wirken, die den Anbau weiterer Zellen zur Folge haben.

Man kann je nach ihrer Entstehung und ihrem Ablauf verschiedene Arten von Gewittern unterscheiden. Maßgeblich ist der auslösende Vorgang für die Aufwindentstehung. Je nachdem, ob dieser durch sommerliche Überhitzung, einen Kaltlufteinbruch oder durch ansteigendes Gelände ausgelöst wird, spricht man von „Wärmegewittern“, „Frontgewittern“ und „orographischen Gewittern“.

Da nun die Zellenbildung durch Einflüsse vom Untergrund her mit gesteuert wird, so kann es dementsprechend — sowohl im Einzelfall als auch im Mittel — zu einer Verstärkung oder Abschwächung der Gewitteraktivität in den

betreffenden Gebieten kommen. Ebenso erklären sich das sogenannte „Hängenbleiben“ und die Richtungsänderungen von Gewittern durch solche Einflüsse auf die Zellenbildung von unten her.

Die Häufigkeit der einzelnen Gewitterarten wechselt in großen Zügen mit der geographischen Breite. In unseren Breiten ist das reine Wärmegewitter selten, während die orographischen und die Frontgewitter überwiegen. In den Tropen liegen die Verhältnisse etwa umgekehrt.

Elektrizitätsbildung im Gewitter

Die Elektrizitätsentwicklung im Gewitter steht in enger Beziehung zur Niederschlagsbewegung innerhalb der Wolken. Da die Bildung rasch fallender großer Niederschlags- teilchen über die Eisphase erfolgt, ist die Elektrisierung großen Maßstabes erst nach Beginn der Vereisung im Quell-Cumulus zu erwarten, wie die Beobachtung auch bestätigt: Funkstörungen und erste — meist nur bei Nacht sichtbare — schwache Blitzentladungen innerhalb der Wolken setzen etwa gleichzeitig mit der beginnenden Vereisung ein.

Das Gewitter ist eine große Elektrisiermaschine, die in der Atmosphäre großräumige Ladungstrennung erheblichen Ausmaßes bewirkt. Energielieferant ist dabei letztlich die Sonne, deren Wärmestrahlung durch Verdunstung und Aufheizung der unteren Luftschichten die einzelnen erwähnten Voraussetzungen für den „Anlauf der Maschine“ schafft. Die arbeitende Substanz der Maschine ist der Niederschlag. Der Wirkungsmechanismus der Maschine besteht im Zusammenwirken von Ladungsbildung und Ladungstrennung. Für die Ladungsbildung lassen sich eine große Zahl von Einzelmöglichkeiten angeben, die auf elektromechanischen, influenz-elektrischen und ähnlichen Grundeffekten aufbauen (siehe unten). Für die großräumige vertikale Ladungstrennung sorgen Schwerkraft und Aufwind.

Die Ladungsanordnung in den einzelnen Gewitterzellen entspricht in der Regel dem in Bild 6 dargestellten Schema: Im unteren Teil der Zelle, d. h. in ihrem Regenbereich, herrscht negative Ladung vor. In der Wolkenbasis kann in diesem negativen Raumladungsgebiet ein meist verhältnismäßig eng begrenztes Gebiet starker positiver Raumladungen eingelagert sein. Dies fällt räumlich mit dem Hauptaufwindbereich an der Vorderseite der Zelle zusammen.

Für die Entstehung der Ladungen ist eine große Zahl von Möglichkeiten gegeben. Die Erklärungen dafür knüpfen in Berücksichtigung bekannter Erfahrungen fast ausnahmslos an das Vorhandensein und die Bewegung von Niederschlagsteilchen in den Wolken an. Man kann bei den Erklärungsversuchen zwei Gruppen unterscheiden, je nachdem, ob sie den entscheidenden Vorgang in Influenzeffekten oder in Grenzflächeneffekten sehen. In Tafel 1 ist eine Reihe solcher Gewittertheorien zusammengestellt und stichwortartig charakterisiert.

Es ist in umfangreichen Diskussionen über die einzelnen Gewittertheorien immer wieder versucht worden, eine Entscheidung darüber zu treffen, welche der zahlreichen Möglichkeiten der Elektrizitätsbildung in den Gewitterwolken nun tatsächlich die „richtige“ ist. Eine eindeutige Antwort auf diese Frage kann bis heute nicht gegeben werden, ist vielleicht auch gar nicht möglich. Denn abgesehen davon, daß entsprechende Untersuchungen in den Gewitterwolken selbst zu schwierig sind, um zu einer experimentellen Entscheidung dieser Frage kommen zu können, scheint es durchaus diskutabel, verschiedene Elektrifizierungsprozesse als möglich zuzulassen und anzunehmen, daß je nach den äußeren Begleitumständen der eine oder andere Prozeß bevorzugt werden kann und daß unter Umständen mehrere Grundprozesse gleichzeitig wirksam sein können.

Die Bedingungen, denen eine Gewittertheorie in jedem Falle genügen muß, sind in ihren Hauptzügen etwa wie folgt zu formulieren:

1. Der Elektrisierungsprozeß muß so geartet sein, daß er unter der ladungstrennenden Wirkung von Schwerkraft und (lokaler) Luftbewegung zu dem bekannten typischen Ladungsaufbau einer „positiv-polaren Wolke“ führt, wie er schematisch in Bild 6 wiedergegeben ist¹⁾.
2. Die Ergiebigkeit des Prozesses muß so groß sein, daß sie im Mittel einen Vertikalstrom von etwa 10^{-8} A/m² bzw. 0,5 bis 1 A je Gewitter zu erzeugen vermag.
3. Die Stromrichtung muß so sein, daß dem Boden negative Ladung zufließt.

Energieumsatz im Gewitter

Faßt man ein Gewitter im technischen Ersatzschaltbild als Wärmekraftmaschine auf, die mit einem elektrischen

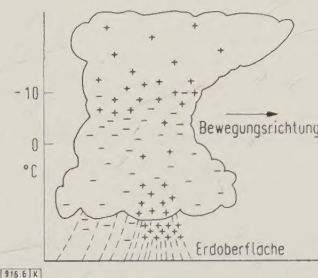


Bild 6. Schematische Darstellung des Ladungsaufbaues in einer Gewitterwolke [2].

Generator gekoppelt ist, so stellt sich die Frage nach dem Energieumsatz der Maschine. Hierzu lassen sich folgende Angaben machen:

Tafel 1. Gewittertheorien.

Grundeffekte		Entstehung der Ladungstrennung
Influenzeffekte		bei Begegnung von Tropfen mit Tropfen
		bei Begegnung von Tropfen und Eisteilchen
		bei Begegnung von Eisteilchen mit Eisteilchen
		bei Begegnung von Tropfen und Ionen
		bei Begegnung von polaren Eisteilchen und Ionen
Grenzflächen- effekte	gasförmig - flüssig	durch Zerreißen von Oberflächenteilen
		durch selektive Ionen- adsorption
	gasförmig - fest	durch Vorgänge beim Schmelzen
		durch Zusammenstoß von Eiskristallen
	flüssig - fest	durch Eissplitter-Ablösung
		durch Reibungsvorgänge
		durch sogenannte „Ver- graupe lung“ ¹⁾
durch Phasen-Potentiale		

1) Vergraupe lung ist ein rasches Zusammenfrieren von flüssigen und festen Wolken- oder Niederschlags-
elementen.

Man kann nach einer Untersuchung des Verfassers die elektrische Leistung eines Gewitters auf Grund einleuchten- der Annahmen über den von ihm erzeugten Strom und die atmosphärischen Widerstandsverhältnisse abschätzen und

1) Ob dabei das untere positive Ladungsgebiet in den Gewitter- wolken immer vorhanden ist, wie es manche Verfasser als Regel an- sehen, ist noch umstritten.

findet so den Wert von $3 \cdot 10^5$ kW. Damit ist aber nur der nach außen wirksame Anteil der elektrischen Leistung des Gewitters erfaßt. Zur Ermittlung seiner Gesamtleistung muß zu diesem „Nutzstrom“ noch der im Inneren des Gewitters fließende „Verluststrom“ addiert werden, der sich auf etwa den 6-fachen Wert des Nutzstromes schätzen läßt. Man kommt so zu einer elektrischen Gesamtleistung der Gewittermaschine von $2 \cdot 10^6$ kW.

Schätzt man — z. B. aus dem Wasserumsatz eines mittleren Gewitters — seine thermodynamische Leistung ab, so kommt man zu einem Betrag von etwa $6 \cdot 10^6$ kW. Die Gegenüberstellung der beiden Werte zeigt, daß die für einen Gewitterablauf erforderliche Leistung zum größeren bzw. überwiegenden Teil auf den thermodynamischen Sektor entfällt.

Gewitteraktivität und Niederschlag

Unter den zahlreichen zur Bearbeitung anstehenden Gewitterproblemen ist in den letzten Jahren eine interessante Frage in den Vordergrund gerückt, die gleichzeitig eine neue Variante der Gewitterforschung und eine Möglichkeit für kurzfristige Niederschlagsvorhersage der einzelnen Gewitter liefert: Die Elektrisierungsprozesse, die zur Ladungstrennung in den Gewittern führen, stehen nach allem, was

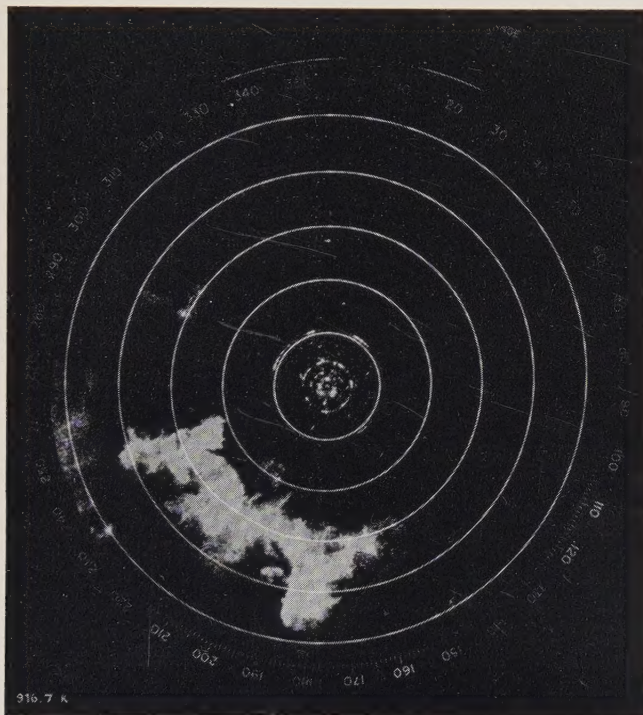


Bild 7. Radaraufnahme eines Gewitters im Südwesten von Berlin am 22. Juli 1960. (Abstand der konzentrischen Kreise voneinander 5 km, Elevationswinkel 6° .)

darüber bekannt ist, in ursächlicher Verbindung mit der Niederschlagsbildung und -bewegung. Es liegt deshalb nahe, die „Ausbeute“ des Elektrisierungsprozesses auch quantitativ zu den in den Wolken „arbeitenden“ Wassermengen in Beziehung zu setzen.

Da angenommen werden kann, daß die Anzahl der Entladungen, die sich in einem im Entstehen begriffenen Gewitter bilden, ein Maß für die „Leistung“ der in ihm wirkenden Elektrisiermaschine darstellen, wird man zu prüfen haben, ob ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Entladungszahl und der in den Wolken enthaltenen Gesamt-Niederschlagsmenge besteht.

Erste Versuche des Verfassers haben dazu vor einigen Jahren ergeben, daß der erwartete Zusammenhang qualitativ vorhanden ist, und daß man wahrscheinlich bei Ausbau dessen in der Lage ist, über den Niederschlagsinhalt

einer Gewitterwolke Vorhersagen zu treffen, die für wirtschaftliche und andere Interessen von Nutzen sein können. Das Verfahren befindet sich inzwischen auch in den USA in Erprobung und Erweiterung.

Wesentliche Hilfe leistet bei solchen Untersuchungen heute das Radar-Verfahren, das vom Boden her unmittelbaren Einblick in die Vorgänge innerhalb der Wolken gestattet. Bild 7 und 8 geben als Beispiel dazu zwei Radaraufnahmen eines Gewitters wieder²⁾.

Bild 7 zeigt das Gesamt-Niederschlagsgebiet des Gewitters. Bild 8, das unmittelbar hinterher mit 30 dB Dämpfung gewonnen wurde, zeigt in dem noch als Nachleuchtbild zu erkennenden Gesamt-Niederschlagsgebiet einige kleinere

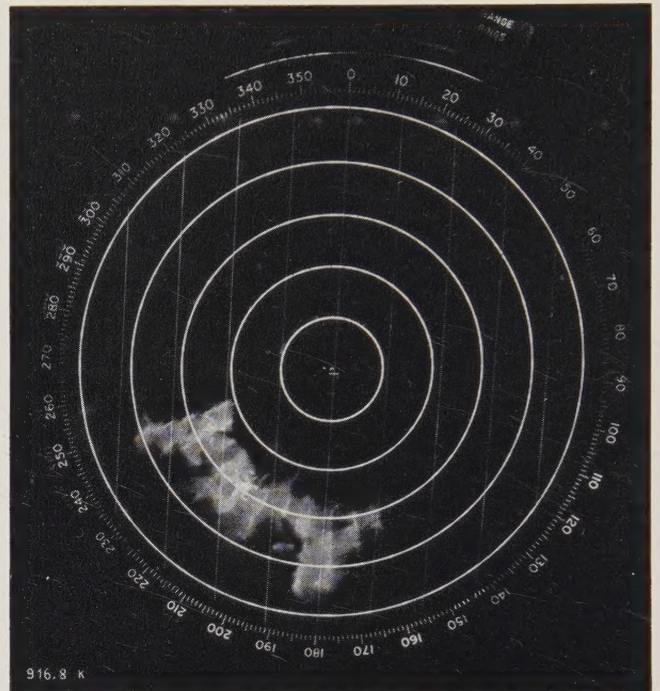


Bild 8. Wie Bild 7, jedoch mit 30 dB Dämpfung. Die Wolkenumrisse sind gegenüber Bild 6 infolge Nachleuchtens der vorhergehenden Aufnahme ohne Dämpfung sichtbar gemacht.

Teile, in denen auch jetzt noch Reflexionen erkennbar werden. Offensichtlich handelt es sich hierbei um die „aktivsten Teile“ des Gewitters, in denen der Niederschlagsgehalt trotz der Leistungsverminderung der Radaranzeige auf etwa $1/1000$ noch merkliche Reflexionen zu erzeugen vermag. Diese Auflösung in einige Aktivitätszentren zeigt gleichzeitig die Zellenstruktur des Gewitters³⁾.

Das Gewitter als Sender

Die rasche Bewegung großer Elektrizitätsmengen in den Kanälen der gewittrigen Entladungen hat die Aussendung elektromagnetischer Wellen zur Folge. Dadurch gewinnt das Gewitter einen neuen Aspekt. Es wird zum Sender elektromagnetischer Impulse. Diese Signale, die sich im Funkempfang als die bekannten Knack- und Kratzgeräusche der Gewitterstörungen unliebsam bemerkbar machen, geben dem Geophysiker und Meteorologen wichtige Hilfsmittel zur Erkundung atmosphärischer Zustände und Entwicklungen an die Hand.

So gibt die Störungszahl Kenntnis von der Entladungshäufigkeit. Da die Reichweite von der Wellenlänge abhängt und das Schwingungsspektrum einer solchen Stö-

²⁾ Die Aufnahmen wurden am 22. Juli 1960 um 16^h 22^m vom Radarturm des Meteorologischen Institutes der Freien Universität Berlin aus aufgenommen. Herrn Prof. Dr. Scherhag sei auch an dieser Stelle für die freundliche Überlassung der Aufnahmen für die Veröffentlichung bestens gedankt.

³⁾ Eine Aufnahme des gleichen Objekts, die 35 min später gemacht wurde, ist in [3] enthalten.

rung im allgemeinen vom Ultralangwellengebiet bis in den Bereich der Kurzwellen reicht, läßt sich der Bereich, aus dem die Störungen aufgenommen werden, durch passende Wahl der Empfangswelle in weiten Grenzen variieren.

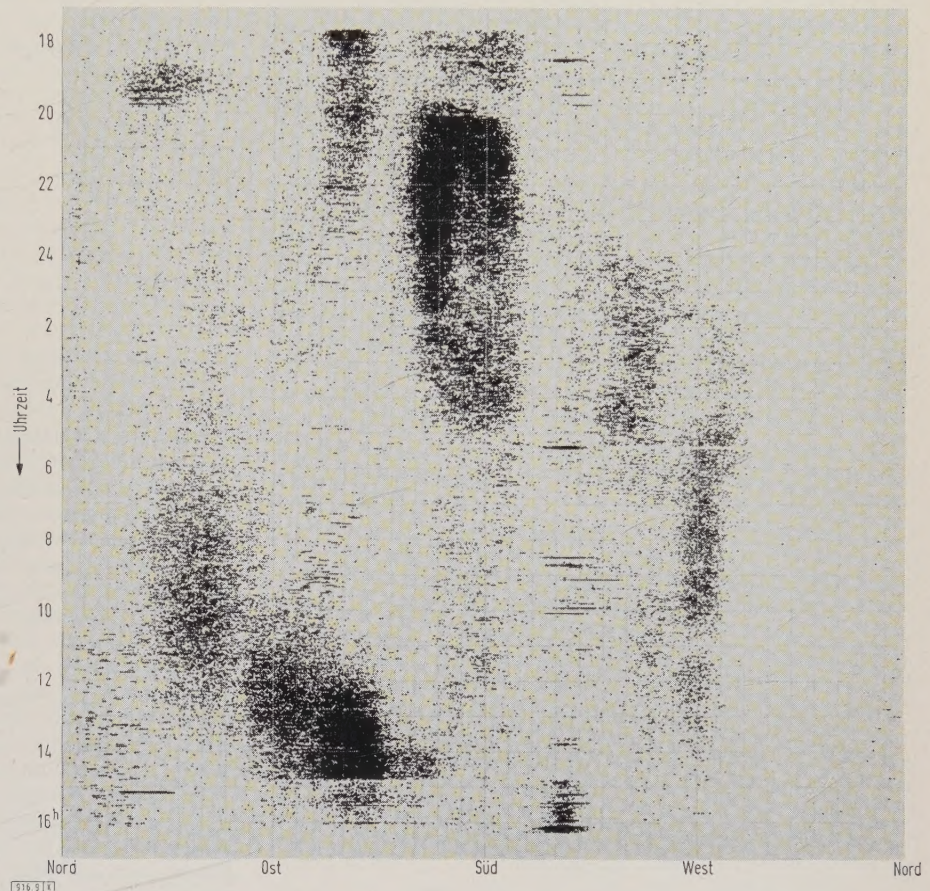
Die Einfallsrichtung der Störungen gibt die Richtung ihres Ursprungortes an. Gleichzeitige Bestimmung der Einfallsrichtung von zwei Meßorten aus gestattet also die Lokalisierung der Störherde (Gewitter).

Die Form der Störungen vermag über den zurückgelegten Weg und die mit ihm verbundenen Einflüsse Auskunft zu geben.

1. Es ist eine bekannte Erfahrung, daß bei Ionosphärenstörungen durch solare Ultraviolett- oder Korpuskular-Ausbrüche, die den Kurzwellenverkehr empfindlich stören und völlig lahmlegen können („Dellinger-Effekt“), gleichzeitig die Bedingungen für die Längstwellenausbreitung erheblich verbessert werden. Die Störungsüberwachung im Längstwellengebiet wird damit zu einem wichtigen Hilfsmittel der Sonnen- und Ionosphärenüberwachung.

2. Die Formänderungen der Störungen durch Reflexion ihrer Wellen an der Ionosphäre lassen entweder bei bekannter Reflexionshöhe Entfernungsbestimmungen des

Bild 9. Radiogoniographen-Registrierung vom 4./5. Mai 1960 in Zürich (mit freundlicher Genehmigung von Dr. G. Nobile, Zürich).



Die Erfahrung zeigt, daß Störungsherde in Form von Gewittern oder gewittrigen Zuständen in der Regel an Kaltfronten, Luftmassengrenzen oder allgemein an Gebiete labiler troposphärischer Schichtung gebunden sind. Die Lokalisierung der Herde und die Beobachtung ihrer Entstehung, Änderung und Wanderung vermögen also dem Meteorologen neue wesentliche Unterlagen für die Wetteranalyse und -prognose zu liefern, die aus sonstigen meteorologischen Beobachtungen unter Umständen nur schwer oder überhaupt nicht gewonnen werden können. Diese Erweiterung der Forschung hat sich vor allem während des vergangenen Krieges zu einem wichtigen Bestandteil der Wetteranalyse entwickelt und Erfahrungen erbracht, die in der Nachkriegszeit in vielen Ländern zu einer ständigen Verbindung der meteorologischen Praxis mit der Störungsüberwachung geführt haben.

Bild 9 zeigt eine Störungsregistrierung mit einem sogenannten Radiogoniographen. In dieser sind die Lage (Richtung), Intensität und zeitliche Veränderung von Störungsherden während eines Tages zu erkennen.

Die Einflüsse der Atmosphäre und vor allem der Ionosphäre auf die Wellenausbreitung bedingen typische Änderungen von Zahl und Form der an einem Ort eintreffenden Störungen, die zu Aussagen über den Ionosphärenzustand kommen können.

Herdes oder bei bekannter Herdentfernung Reflexionshöhenbestimmungen zu. Da Längstwellen an der D-Schicht reflektiert werden, gibt die Formbestimmung von Längstwellenstörungen ein Hilfsmittel zur D-Schicht-Untersuchung.

Zusammenfassung

Das Gewittergeschehen hebt sich im Wetterablauf besonders durch seine Entladungserscheinungen hervor. Die Arbeit gibt einen kurzen Überblick über die Entstehung und den Ablauf eines Gewitters sowie über die Vorgänge der Ladungstrennung. Besonders charakteristisch ist der von amerikanischer Seite entdeckte Zellaufbau des Gewitters, der im einzelnen besprochen wird. Die Elektrizitätsbewegung in den Kanälen der gewittrigen Entladung haben die Aussendung elektromagnetischer Impulse zur Folge. Die systematische Untersuchung dieser „Gewitterstörungen (Spherics)“ nach Zahl, Einfallsrichtung und Form ist in den letzten Jahrzehnten zu einem wichtigen Hilfsmittel für die Erforschung der Eigenschaften der Atmosphäre im Gewitterbereich und im Ionosphärenbereich geworden.

Schrifttum

- [1] World distribution of thunderstorm days. WMO/OMM (World Meteorological Organization / Organisation Météorologique Mondiale). Nr. 21 TP 6 und 21, Genf 1953 und 1955.
- [2] Byers, H. R., u. Braham, R. R.: The Thunderstorm. Washington 1959.
- [3] Dolezalek, H.: Gewitterforschung II: Optische und meteorologische Methoden. Umschau Bd. 61 (1961) H. 2, S. 51–53.

Zur Physik der Blitzentladung

Von Dietrich Müller-Hillebrand, Uppsala*)

DK 551.594.221

Einführung

Vor 14 Jahren schrieb *H. Wichmann* ein ausgezeichnetes kleineres Buch über die Physik des Gewitters [1]. Die Verknüpfung hydrodynamischer Fragen mit elektrizitätsbildenden Effekten, die Ladungsbildung und die elektrischen Felder, das Entstehen der Blitzbahn und die planetarischen Wirkungen der Gewitterbildung umfaßt die Physik dieses von *Wichmann* behandelten Spezialgebietes. Seit 200 Jahren ist dieses Gegenstand großen Interesses, seit zwei Generationen sind Tausende von Untersuchungen hierüber veröffentlicht worden. Und doch sind immer noch wesentliche Fragen nicht klargelegt. Die Erklärung hierfür liegt einmal darin, daß der Gewitterraum in den Wolken unzugänglich ist und daß sehr kleine Größen gemessen werden müssen, deren Wirkung auf der Erdoberfläche nur deshalb feststellbar ist, weil sie die Summe der Wirkungen von vielen Billionen Ladungsträgern ausmacht, die auf Riesengebiete verteilt sind. Meßtechnische Schwierigkeiten und die außerordentliche Mannigfaltigkeit der Blitzvorgänge und Erscheinungen sind weitere Gründe für die noch ungeklärten Fragen.

Weltweite Erscheinungen beim Gewitter

Die planetarische Wirkung der Gewitter besteht darin, daß positive Elektrizität zur Ionosphäre und nega-

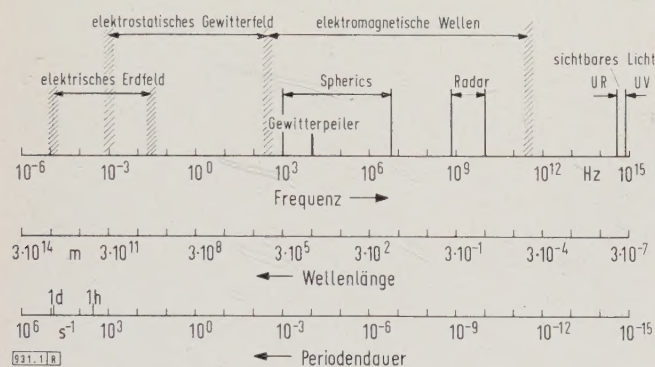


Bild 1. Frequenzbereich luftelektrischer Vorgänge.

tive zur Erde transportiert wird. Dadurch wird ein luftelektrisches Feld mit einer Potentialdifferenz von 350 kV bis 400 kV aufrechterhalten. Da jedoch Land und Meer ungleichmäßig über die 360 Längengrade der Erde verteilt sind, zeigt auch die Weltgewittertätigkeit ein tägliches Maximum und Minimum. Die Folge sind tägliche Schwankungen des elektrischen Feldes mit einem Maximum am Nachmittag (Greenwicher Zeit, Weltzeit) und einem Minimum 12 h später. Auch örtliche Einflüsse treten auf. Rechnet man die durch Raumladungen bedingten Schwankungen hinzu, so umfaßt das Frequenzband von 10^{-5} bis 10^{-3} Hz die zeitlichen Änderungen des elektrischen Erdfeldes (Bild 1), das eine Stärke von einigen zehn bis einigen hundert Volt je Meter auf der Erdoberfläche aufweist. Elektrisch geladene Wolken lassen die Feldstärke auf einige tausend Volt je

Meter ansteigen; dieser Vorgang spielt sich innerhalb einiger 10 min bis etwa 10 s ab, entsprechend dem Frequenzband von 10^{-3} bis 10^{-1} Hz.

Der Zusammenbruch des elektrischen Feldes durch den Blitz hat eine weltumfassende Wirkung im buchstäblichen Sinne des Wortes. Die elektromagnetische Strahlung ist nachweisbar im Frequenzband von etwa 1 bis 10^9 Hz. Die untere Grenze von 1 Hz ist aus dem Strahlungsspektrum des Blitzes berechnet [2, 3], die Größenordnung 10^9 Hz ist im Radargerät mit einer Frequenz von 2800 MHz bei einem Abstand von 212 km von der Gewitterwolke beobachtet worden [4]. Die Energie der Blitzstrahlung beträgt ungefähr 300 kW [5], die Leistung etwa 3000 bis 9000 MW, wobei die Dichte der den Blitzkanal verlassenden Strahlungsleistung etwa 10 bis 30 MW/m² ist. Sie hat ein Maximum im Frequenzbereich um 10 kHz herum. Blitzentladungen lassen sich in diesem Frequenzgebiet auf Tausende von Kilometern Abstand anpeilen, und zwar mit außerordentlicher Genauigkeit. So können z. B. von Neu-England aus mit Hilfe von vier Stationen Gewitter in 4830 km Abstand mit einem mittleren Fehler von 50 km angepeilt werden [6].

Eine weltweite Wirkung ist an das Frequenzband um 5 kHz herum gebunden, nämlich die Erscheinung der „Whistler“. Im Jahre 1888 von Prof. *Perntner* an einer 22 km langen Telephonleitung mit der Erde als Rückleiter am Sonnenblick-Observatorium im Telephon gehört, wurden die langgezogenen, in der Tonhöhe abfallenden Laute von *Barkhausen* beschrieben [7] und haben seit 10 Jahren besondere Bedeutung in der Erforschung der Exosphäre der Erde gewonnen [8]. Diese „Whistler“ entstehen unter besonderen Umständen durch Blitzentladungen. Die elektrischen Wellen im Frequenzgebiet um 5 kHz herum pflanzen sich im Raume bis zum 10-fachen Erdradius fort unter Wechselwirkung der vorhandenen Elektronen und des Erdmagnetfeldes. Sie folgen im wesentlichen den geomagnetischen Kraftlinien, sind daher im breiten Band um den magnetischen Äquator der Erde nicht nachweisbar und haben eine Laufzeit von 1,5 bis 4 s, das ist das 10,5- bis 28-fache der Laufzeit entlang der Erdoberfläche. Zur Zeit verfolgen mehr als 40 Beobachtungsstationen auf der nördlichen und südlichen Hemisphäre diese weltweiten Blitzerscheinungen, die zur Erforschung der Vorgänge in der Exosphäre bedeutungsvoll sind.

Ob Signale, die von den Planeten Venus und Jupiter bei der Frequenz 27 MHz empfangen wurden [9], wirklich von Blitzen herkommen, ist noch eine offene Frage. Es ist möglich, daß die in diesem Frequenzband abgestrahlte Blitzenergie nicht ausreicht, um auf der Erde empfangen zu werden [10], jedoch ist unser Wissen über die Feldstärken bei hohen Frequenzen noch lückenhaft.

Der Verlauf der Blitzentladung

Die optischen und elektrischen Untersuchungen von *Schonland*, *Malan* und Mitarbeitern, die von 1934 bis 1953 in 10 Arbeiten veröffentlicht wurden, haben die verwickelten und verschiedenartigen Prozesse der Blitzentladung weitgehend geklärt [11 bis 14]. Der sichtbare Erdblitz ist nur ein Teilprozeß. Die gesamte Blitzentladung läßt sich unterteilen in:

1. Vorentladungen in der Wolke und Ausbildung des Leitpfades zwischen Wolke und Erde,
2. Entstehen des helleuchtenden Erdblitzes,
3. Entladungen innerhalb der Wolke sowie zwischen Wolke und Erde,
4. Entstehen eines zweiten Erdblitzes,
5. mögliche Wiederholung des Vorganges unter 3 und 4,
6. Entladungen nach dem letzten Erdblitz.

*) Dr.-Ing. D. Müller-Hillebrand ist ordentlicher Professor an der Universität Uppsala und Vorstand des Institutes für Hochspannungsforschung.

Die in der Arbeit beschriebenen Untersuchungen am Monte San Salvatore sind das Ergebnis einer Zusammenarbeit mit Professor Dr. K. Berger, Zürich. Die Untersuchungen wurden von der Königlich Schwedischen Wasserfalldirektion und dem Schwedischen Naturwissenschaftlichen Forschungsrat unterstützt. Sie wurden weiter besonders gefördert durch die Officina Elettrica Comunale in Lugano (Direktor A. Emma), durch den Service Radio e Televisione, PTT Lugano (Dipl.-Ing. C. Riva) und durch Herrn Schless, Agra. Die Messungen des magnetischen Feldes wurden von Dipl.-Ing. B. Kerzar, Assistent an der Elektrotechnischen Fakultät der TH Ljubljana, ausgeführt. Die Photographien der Blitze stammen von Civ.-Ing. H. Peterson, Technische Hochschule, Stockholm.

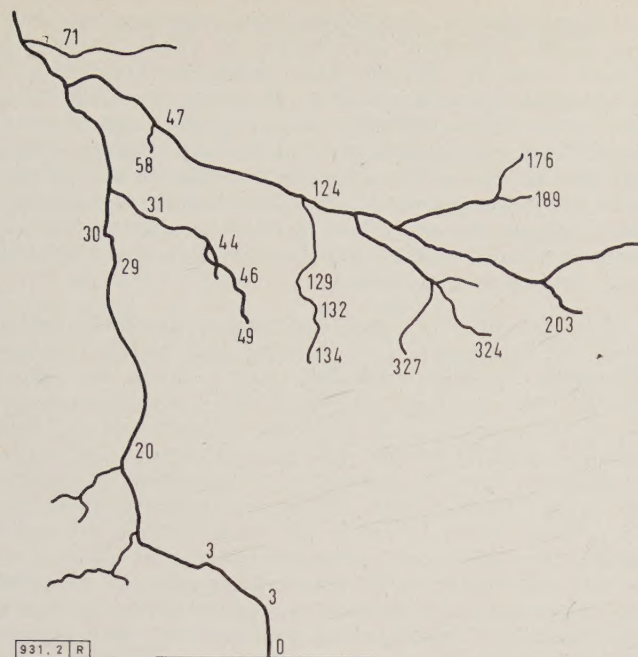


Bild 2. Wachstum des Blitzkanals (nach D. J. Malan). Die angegebenen Zahlen bedeuten Mikrosekunden.

Von der Wolke aus wächst in Richtung zur Erde ein Leitpfad mit Ruckstufen (stepped leader). Die Stufenlänge beträgt etwa 10 m bis etwa 200 m (im Mittel etwa 50 m). Sie wird pfeilartig durchlaufen (dart leader), die Geschwindigkeit ihres Entstehens wird mit $50 \text{ m}/\mu\text{s}$ zu $1/6$ der Lichtgeschwindigkeit geschätzt. Die Pausen zwischen den Sprüngen betragen 40 bis $120 \mu\text{s}$ (im Mittel $50 \mu\text{s}$). Die mittlere Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Leitpfades ist etwa 10 bis $40 \text{ cm}/\mu\text{s}$.

Der Vorwachsprozeß wird merklich durch Raumladungen in der Luft, das sind für das Auge unsichtbare elektrische Wolken, beeinflusst. Zur Raumladungswolke hin werden die Pausen verkürzt, und damit steigt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit auf Werte über $2 \text{ m}/\mu\text{s}$. Von der Raumladungswolke weg zur Erde hin werden die Pausen verlängert, ja sogar so weit, daß die Entladung zum Stillstand kommt, bevor sie die Erde erreicht hat. Setzt die Vorentladung jedoch ihren Weg fort, so stellt man häufig die erwähnte Fortpflanzungsgeschwindigkeit von $10 \text{ cm}/\mu\text{s}$ fest.

In Erdbodennähe schlägt der Vorentladung eine Fangentladung entgegen. Der Leitpfad, der Wolkenladungen schlauchartig zur Erde hin transportiert hat, entlädt sich. Die Geschwindigkeit ist bis 800-mal größer als die des Leitpfades (Bild 2).

Aus Veröffentlichungen von Schonland und Mitarbeitern ergeben sich die in Tafel 1 zusammengestellten Werte der Wachstumsgeschwindigkeit des Blitzes, und zwar der Geschwindigkeit, mit welcher der Blitz innerhalb der ersten rd. $5 \mu\text{s}$ wächst, ferner der mittleren Geschwindigkeit, mit der sich räumlich der Blitzkanal fortpflanzt, und schließlich der mittleren Geschwindigkeit in vertikaler Richtung¹⁾.

Bei 10 % aller untersuchten Blitze war die Wachstumsgeschwindigkeit innerhalb der ersten $5 \mu\text{s}$ größer als $160 \text{ m}/\mu\text{s}$ (oberes Dezil), d. h. größer als 53,3 % der Lichtgeschwindigkeit. In vertikaler Richtung war die mittlere Wachstumsgeschwindigkeit (Geschwindigkeit der Höhenzunahme) mehr als $61 \text{ m}/\mu\text{s}$ in 10 % aller untersuchten Fälle. Die Geschwindigkeit des ersten Teilblitzes nimmt an jedem Verzweigungspunkt ab. Bruce und Golde haben für die Ge-

schwindigkeitsabnahme ein exponentielles Gesetz gefunden, nämlich [16]

$$v = v_0 e^{-\gamma l} \quad (1)$$

Mit den Werten $v_0 = 80 \text{ m}/\mu\text{s}$ und $\gamma = 3 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ entspricht dies einem Blitz mittlerer Wachstumsgeschwindigkeit (Tafel 1), der nach $30 \mu\text{s}$ etwa 60 % der Gesamtbahn von 2,67 km zurückgelegt hat (Bild 2).

Dem ersten Teilblitz folgt häufig eine neue Vorentladung mit der gleichen Entladungsbahn wie der erste Blitz, wenn die Stromstärke nicht zu gering und die Pause nicht zu lang war. Die Vorentladung pflanzt sich verhältnismäßig schnell fort, nämlich im Mittel mit $2 \text{ m}/\mu\text{s}$ innerhalb der Grenzen von 1 bis $20 \text{ m}/\mu\text{s}$, in Richtung zur Erde mit einem etwa 40 m langen pfeilartigen „Kopfstück“ (dart leader), Ruckstufen sind nicht zu erkennen. Dieser zweite Leitpfad ist nicht verästelt. Deswegen ist die Wachstumsgeschwindigkeit des zweiten Blitzes zeitlich konstant und nimmt nicht exponentiell ab.

Dieser Vorgang wiederholter Entladungen tritt häufig auf. In einem ungewöhnlichen Fall [17] wurde eine 2 s lang dauernde Blitzentladung gemessen, bestehend aus 26 Einzelentladungen mit Pausen von 12 ms bis 289 ms Dauer und mit 28 den Teilblitzen folgenden Strompulsationen, zusammen also mit 54 entladenen Raumladungsgebieten, die sich bis in 9 km Höhe erstreckten. Bei diesen Entladungen waren etwa 4 bis 6 Gewitterzellen beteiligt, die zufällig gleichzeitig das „Reifestadium“ erreicht hatten.

Die Blitzentladung startet da, wo die Feldstärke für den elektrischen Durchbruch der Luft genügend groß ist. Dies kann im unteren Teil der Wolken in etwa 2,5 bis 3,5 km Höhe sein. Der Durchbruch kann auch an der Erde beginnen, wenn hohe Berge oder hohe Gebäude das elektrische Feld stark konzentrieren. Die eingehenden Untersuchungen von McEachron [18] und Hagenguth [19] über den Blitzeinschlag in das Empire State Building in New York bestätigen den gleichen Vorgang des ruckweise sich fortplanzenden, zur Wolke gerichteten Leitpfades, der mit einer Geschwindigkeit von etwa $20 \text{ cm}/\mu\text{s}$ bis $2 \text{ m}/\mu\text{s}$ zur Wolke hin eilt. Dort angekommen, ist der Verlauf der Entladung verschieden. Entweder bereitet sich eine Entladung vor, die sich nach 10 bis 20 ms Pause ruckweise zur Erde hin in bekannter Weise fortpflanzt, oder die Wolke entlädt sich mit verhältnismäßig niedrigem Strom von einigen hundert Ampere unmittelbar im Anschluß an die Vorentladungen, ein Vorgang, der eine halbe Sekunde lang dauern kann. Diese Messungen und vor allem diejenigen von K. Berger auf dem Monte San Salvatore bei Lugano [20] haben eine Fülle von Beobachtungsergebnissen erbracht und damit die Zahlenangaben so bereichert, daß Summenkurven der Häufigkeit von Blitzladung, Stromstärke und Anstiegs geschwindigkeit des Stromes aufgestellt werden konnten.

Tafel 1. Blitzgeschwindigkeiten.

1	2	3	4	5
Wert	%	Wachstumsge- schwindigkeit in- nerhalb der ersten $5 \mu\text{s}$ ¹⁾ $\text{m}/\mu\text{s}$	mittlere Fort- pflanzungsge- schwindigkeit im Kanal ²⁾ $\text{m}/\mu\text{s}$	mittlere Wachs- tumsge- schwindigkeit in vertikaler Richtung ²⁾ $\text{m}/\mu\text{s}$
Mittelwert	—	81	59	37,3
unteres Quartil	75	50	38	27
Medium	50	76	50	33
oberes Quartil	25	115	69	46
oberes Dezil	10	160	103	61

1) Die Werte sind aus den von Schonland, Collens und Malan veröffentlichten Bildern [12 bis 14] ermittelt.

2) Die Werte stammen aus den in [12], Tafel IV, angeführten Einzelwerten unter Berücksichtigung dessen, daß die Geschwindigkeit der dreidimensionalen Entladung im Kanal 30 % größer als die angegebene zweidimensionale ist.

1) Die in Tafel 1, 2 und 4 benutzten Bezeichnungen „unteres Quartil“, „oberes Quartil“, „Medium“ und „oberes Dezil“ werden bei statistischen Forschungen angewendet. Sie kennzeichnen die Streuung und geben den Wert des betreffenden Argumentes wieder, z. B. die Blitzgeschwindigkeit oder den Blitzstrom, der bei einer Häufigkeit von 75 % (unteres Quartil), 50 % (Medium), 25 % (oberes Quartil) oder 10 % (oberes Dezil) erreicht oder überschritten wird.

Blitzkenngrößen

Bei technischen Messungen ist man gewohnt, einige Zehntel bis einige Prozent Meßfehler in Kauf zu nehmen. Für physikalische Messungen sind die Forderungen an Meßgenauigkeit oftmals weit höher, z. B. bei spektralanalytischen Untersuchungen, die einen kleineren Meßfehler als 10⁻⁷ % aufweisen können. Bei Gewitteruntersuchungen wird man sich mit einem Fehler von ± 20 % begnügen. Es liegt in der Eigenart des Meßobjektes und der Meßmethoden, daß Meßfehler, die bis mehr als den 10-fachen Meßbetrag ausmachen können, als solche nicht sofort erkannt werden, sondern viele Jahre lang ein verborgenes Dasein führen können. Diese eigentümlichen Verhältnisse werden dadurch begünstigt, daß Autoren mancher Arbeiten sehr sparsam in Angaben über die Meßmethoden sind. Eine Meßgröße ist nicht identisch mit der sie erzeugenden Naturgröße. Hier hat sich die Betrachtungsweise der Vierpoltheorie als fruchtbar erwiesen. Durch die „Übertragungsfunktion“ (Response), abhängig von der Frequenz, können Meßgenauigkeit im zu messenden Bereich und Meßfehler angegeben werden.

Appleton, Watson-Watt und Herd haben im Jahre 1926 die Methodik zur Messung der von Blitzen abgestrahlten elektromagnetischen Wellen geklärt, mittels Oszilloskop und 300-fachem Verstärker (rd. 50 dB) Untersuchungen durchgeführt und damit den Grund für die Technik der modernen Blitzforschung gelegt [21]. Da das Oszilloskop aber damals noch nicht weit genug zur Aufnahme rascher Vorgänge entwickelt war, wurde dieser Weg jahrelang nicht von anderen beschritten. Die Messungen von Überspannungen an Energieübertragungsleitungen wurden vielmehr mit „offenen“ Kaltkathodenstrahl-Oszillographen durchgeführt. Die hierzu notwendigen kapazitiven Spannungsteiler, welche die Spannung im Verhältnis 1 : 1000 bis 1 : 500 herabsetzen, haben zu vielen Bedenken Anlaß gegeben. Vielfach wurden Isolatorenketten mit Strahlungsringen

als Spannungsteiler und Meßleitungen von 10 m und größerer Länge verwendet. Die Eichung im Laboratorium kann jedoch nicht die Beeinflussung durch die Gewitterwolke wiedergeben. Unkontrollierbare Vorgänge sind die Folge. Bei einem Spannungsteiler muß eine Beeinflussung von Meßleitungen ausgeschlossen und die Übertragungsfunktion bekannt sein, damit man Gewähr für eine richtige Wiedergabe des Vorganges hat [22, 23 S. 751]. Die Wiedereinführung des Oszilloskopes sowie des Verstärkers und die Verwendung geschirmter und abgeglichener Kabel ermöglichten eine befriedigende Messung.

Hier sei auf eine Zusammenstellung älterer Ergebnisse über Überspannungen [23] verzichtet und nur die Summenhäufigkeit der Blitzkenngrößen Ladung, Strom und Stromanstieg wiedergegeben (Bild 3). Die Ladungsmenge der Vorentladungen (Kurve 1), ermittelt aus Höchstwert des Blitzstromes multipliziert mit dessen Halbwertszeit, geben ein ungefähres Maß für diejenigen Ladungen des Leitpfades, die ihren Ausgleich nach Erde finden. Bemerkenswert sind die kleinen Werte (100 mC), die auf Entladung nur kurzer Längen des Leitpfades schließen lassen. Der Höchstwert, 4,9 C, wurde bei einem Blitz von 58 kA und 85 µs Halbwertsdauer gemessen. Die gesamte Ladung bei einem aus mehreren Teilblitzen bestehenden Blitz in das Empire State Building (Kurve 2) ist wesentlich höher. In einem von 73 Fällen wurde eine Gesamtladung von 164 C gemessen, ein Betrag, der nach den Messungen von Berger (Kurve 3) mehrmals übertroffen wurde [20]. Die Ladungen, die dem Empire State Building in New York (Kurve 2), anderen hohen Gebäuden (Kurve 4), ermittelt von McCann [24], und dem Monte San Salvatore (Kurve 3) zufließen, haben annähernd gleiche Verteilungen der Summenhäufigkeit. Ähnliches gilt für den Ladungsausgleich zwischen den Wolken (Kurve 5), der aus Feldänderungen indirekt von Reynolds und Neill ermittelt wurde [25]. Bei Entladungen, die nicht von hohen Gebäuden oder hohen Bergen aus eingeleitet werden, ist die durchschnittliche Ladungsmenge wesentlich kleiner. Repräsentativ sind Werte der Kurve 6 [25]. Ganz aus dem Rahmen fallen in Japan im Jahre 1941 gemessene Werte [26], die möglicherweise durch die Meßmethode bedingt zu groß sind (Kurve 7).

Die Blitzströme (Bild 3) geben eine gut übereinstimmende Häufigkeitsverteilung, wenn man von Strömen unter 3 kA absieht, mag es sich um Messungen in der Schweiz [20] (Kurve 1), in den USA [24] (Kurve 2) oder in Schweden [27, 28] (Kurve 3) handeln. Lediglich die von Hagenguth am Empire State Building gemessenen Stromstärken [19] liegen tiefer (Kurve 9). Für Ladungen und Ströme erhält man die Häufigkeitswerte der Tafel 2, die auch Angaben über Blitzströme nach AIEE [29] enthält.

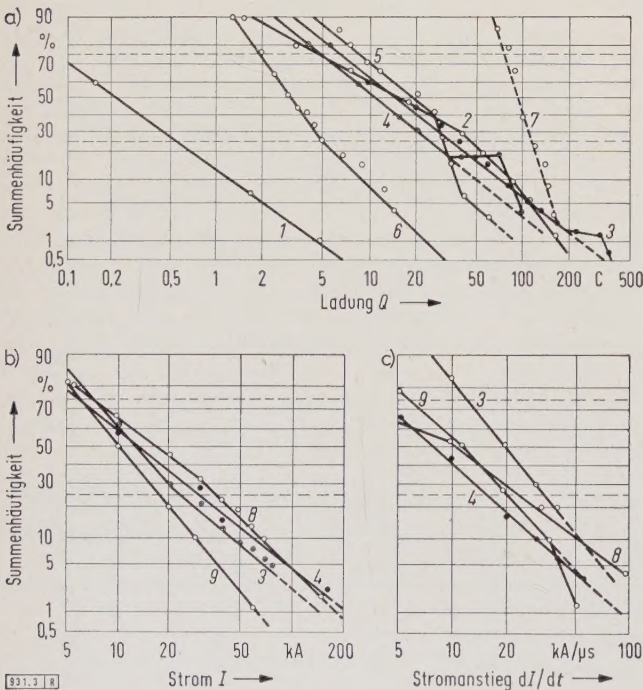


Bild 3. Summenhäufigkeit a) der Ladung, b) des Stromes und c) des Stromanstieges von Blitzen. Die einzelnen Kurven zeigen Ergebnisse der Messungen von

- 1, 2 McEachron
- 3 Berger
- 4 McCann
- 5, 6 Reynolds, Neill
- 7 Hatakeyama
- 8 Hylthén-Cavallius, Müller-Hillebrand
- 9 Hagenguth

Tafel 2. Blitzladungen und Blitzströme.

Wert	%	Blitzladungen			Blitzströme	
		Vor-entladung C	Entladung nach Erde C	Entladung zu hohen Punkten C	Meßwerte kA	nach AIEE kA
unteres Quartil	75	0,09	2,1	7,3	6 bis 7	8
Medium	50	0,22	3,3	15	10 bis 16	16
oberes Quartil	25	0,54	5,5	35	18 bis 32	38
oberes Dezil	10	1,20	9,3	70	28 bis 65	50

Die Werte der Anstiegsgeschwindigkeit des Blitzstromes sind je nach Untersuchungsmethode und Untersuchungsort uneinheitlich (Bild 3). Meßtechnisch schwierig zu erfassen, vermitteln sie nicht die notwendige Kenntnis über den Vorgang unmittelbar bei und nach dem Blitzzeinschlag. Die Frage, wie schnell Ladungen aus dem Leitpfad dem geerdeten Teil zufließen können, ist heute noch nicht geklärt.

Der Leitpfad und der Umschlag in den Blitzkanal

Die Geschwindigkeit des von der Wolke zur Erde wachsenden Leitpfades ist bekannt, dagegen ist der Vorgang in den Pausen zwischen den Ruckstufen nicht endgültig geklärt. *Schonland* führt Gründe für die Existenz eines „Lotsenstrahles“ (pilot streamer) an, der den Weg für den in Ruckstufen vorschreitenden Leitpfades bahnt. Aber weder optische noch elektrische Untersuchungen haben sichere Beweise hierfür bringen können. Aus Messungen des elektrischen Feldes ergibt sich eine ziemlich gute Übereinstimmung mit den optisch gewonnenen Ergebnissen. *Kitagawa* und *Kobayashi* [30] haben das Meßverfahren verfeinert und als häufigste Pausenlänge zwischen den Ruckstufen 40 bis 60 μs (Grenzwerte etwa 20 bis 250 μs) festgestellt, bei Annäherung des Leitpfades an den Erdboden wird die Pause kürzer und beträgt am häufigsten 14 μs etwa 1 ms vor Erreichen der Erde. Bei einer Geschwindigkeit von 30 cm/ μs bedeutet dies, daß die letzten 300 m mit kürzeren Pausen zwischen den Ruckstufen zurückgelegt werden.

Der Strom des vorwachsenden Leitpfades schließt sich kapazitiv zu einem Stromkreis. Nach *Rüdenberg* [31] besteht angenähert folgender Zusammenhang zwischen dem Radius r des Strompfades, der mit der Geschwindigkeit v vorwächst, dem Strom I und der elektrischen Durchbruchfeldstärke \mathcal{E}

$$r = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 v \mathcal{E}} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 \mathcal{E}} \quad (2)$$

In Gl. (2) bedeuten

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ AsV}^{-1}\text{m}^{-1} \text{ die Influenzkonstante,}$$

$q = I/v$ die auf die Länge des Strompfades bezogene, transportierte Ladung.

Mit $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1$ als Ionisierungsfeldstärke am Kopf einer verhältnismäßig dünnen pfeilartig vorschießenden Vorentladung $q = q_1$ erhält man aus Gl. (2) den dazu gehörenden Radius $r = r_1$ des Strompfades. Zum Beispiel ergibt sich für eine vermutlich etwas zu niedrig eingesetzte Ionisierungsfeldstärke von

$$\mathcal{E}_1 = 60 \text{ kV/cm} = 6 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1}$$

und für eine transportierte Ladung von

$$q_1 = 4 \mu\text{C/m} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ As m}^{-1}$$

aus Gl. (2) ein Kopfradius von

$$r_1 = \frac{18 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ As m}^{-1}}{10^{-9} \text{ AsV}^{-1}\text{m}^{-1} \cdot 6 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1}} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 12 \text{ mm.}$$

Bei größerer Ionisierungsfeldstärke ist der Kopfradius entsprechend kleiner.

Der, wie oben angedeutet, geschaffene Leitkanal dehnt sich aus, sein Radius wird größer, bis die elektrische Durchbruchfeldstärke der Luft an den Grenzen des schlauchartigen Gebildes unterschritten wird. Diese Feldstärke sei $\mathcal{E} = \mathcal{E}_2$, der dazugehörige Radius des Leitpfades $r = r_2$ und die transportierte Ladung $q = q_2$. Man kann etwa annehmen

$$\mathcal{E}_2 = 10 \text{ kV/cm} = 10^6 \text{ Vm}^{-1}.$$

Die Pausen zwischen den Ruckstufen sind etwa 100-mal länger als die Zeit für die vorschießende Vorentladung. Nimmt man an, daß während der Pause Ladung gleichmäßig dem Leitpfad zufließt, so wird

$$q_2 = 100 q_1.$$

Mit diesem Wert und $\mathcal{E}_2 = 1/6 \cdot \mathcal{E}_1$ erhält man aus Gl. (2), verglichen mit dem unter obigen Voraussetzungen errechneten

neten Kopfradius r_1 der pfeilartig vorschießenden Vorentladung, einen Radius r_2 des schlauchartigen Gebildes von

$$r_2 = 600 r_1 = 7,2 \text{ m.}$$

Der Leitpfad mit recht ansehnlichen Abmessungen schlägt bei Berührung mit der Fangentladung in den Blitzkanal um. Aus einer Ladung von 400 $\mu\text{C/m}$ und einer Vorwachs-geschwindigkeit von $v = 100 \text{ m}/\mu\text{s}$ ergibt sich ein Blitzstrom von 40 kA. Der Durchmesser des Kanals läßt sich zu etwa 1 cm bis 10 cm aus Laboratoriumsversuchen abschätzen. Den Übergang vom Leitpfad von mehreren Metern Durchmesser bis zum Blitzkanal kann man sich als Stromfluß von Tausenden von Plasmakanälen vorstellen. Diese Vielzahl von Funkenbüscheln bestimmt die Wachstumsgeschwindigkeit des Blitzes, nicht der Blitzkanal. Denn setzt man in Gl. (2) bekannte Werte der Geschwindigkeit, des Stromes und des Kanalradius ein, so erhält man undiskutabel hohe Werte für die Ionisierungsfeldstärke.

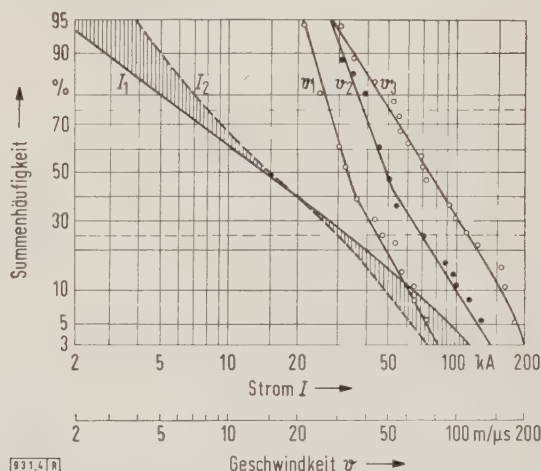


Bild 4. Summenhäufigkeit der Blitzstromstärke I und der Geschwindigkeit v des Blitzwachstums.

I_1 Ströme nach Bild 3 b I_2 Ströme nach AIEE
 v_1 Wachstumsgeschwindigkeit nach Tafel 1, Spalte 3
 v_2 Wachstumsgeschwindigkeit nach Tafel 1, Spalte 4
 v_3 Wachstumsgeschwindigkeit nach Tafel 1, Spalte 5

Den Zusammenhang zwischen Blitzstromstärke I und Wachstumsgeschwindigkeit v hat *Lundholm* [32] theoretisch ermittelt und mit Hilfe des empirischen Funkengesetzes von *Toepler* hierfür die Beziehung gefunden

$$v/c = \frac{1}{\sqrt{1 + A/I}} \quad (3)$$

wobei $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ die Lichtgeschwindigkeit ist und der Wert A von *Lundholm* zu 900 kA, von *Rusk* [33] dagegen zu 500 kA angegeben wurde. Nun läßt sich zeigen, daß je nach dem Zweck, den man mit der Rechnung verfolgt, die nachstehenden Werte von A am besten mit den Beobachtungen übereinstimmen:

$A = 200 \text{ kA}$ für den Blitzkanal innerhalb der ersten 5 μs , das ist also ein Wert, der am ehesten mit Funkengesetzen zu vergleichen ist, da die Geschwindigkeit v nach 10 μs entsprechend den Untersuchungen von *Bruce* und *Golde* nach Gl. (1) merklich abnimmt;
 $A = 500 \text{ kA}$ für die mittlere Wachstumsgeschwindigkeit im dreidimensionalen Kanal;
 $A = 900 \text{ kA}$ für die mittlere Geschwindigkeit der Höhenzunahme eines annähernd senkrechten Blitzes.

In Bild 4 ist die Summenhäufigkeit der drei für die Blitzentladung typischen Geschwindigkeiten wiedergegeben, deren charakteristischen Werte in Tafel 1 zusammengestellt sind. Außerdem ist in Bild 4 die Summenhäufigkeit der Blitzströme eingetragen, dabei sind I_1 die Werte aus Bild 3, die in Schweden festgestellt wurden, und I_2 die AIEE-Werte [29]. Die für gleiche Summenhäufig-

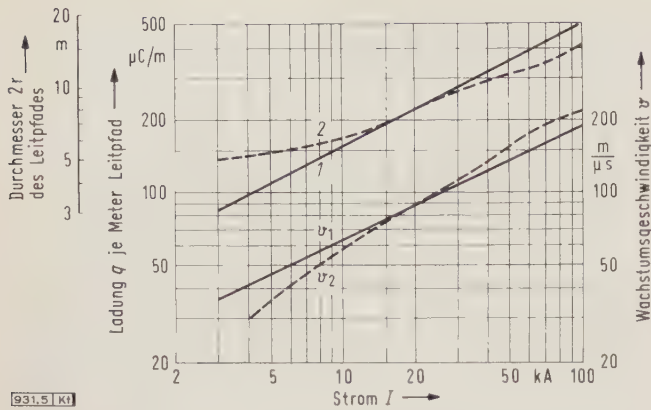


Bild 5. Zusammenhang zwischen den Blitzkenngrößen, nämlich Wachstumsgeschwindigkeit v , Durchmesser $2r$ des Leitpfades und Ladung q je Meter Leitpfad in Abhängigkeit vom Strom I .

Kurve 1 zeigt die Abhängigkeit von $2r_1$ und q_1 von I
 Kurve 2 zeigt die Abhängigkeit von $2r_2$ und q_2 von I
 v_1 und Kurve 1 gelten für Ströme nach Bild 3 b,
 v_2 und Kurve 2 gelten für Ströme nach AIEE.

keiten geltenden Werte des Blitzstromes und der maximalen Blitzgeschwindigkeit zeigen den Zusammenhang nach Bild 5. Hieraus lassen sich die Ladungen je Meter Leitpfad und gemäß Gl. (2) der Durchmesser des Leitpfades entnehmen. Für 20 kA Blitzstrom erhält man als maximale Blitzgeschwindigkeit 90 m/µs, eine Ladung von 222 µC/m und einen Durchmesser von 8 m. Für einen Blitzstrom von 80 kA ergibt sich eine Geschwindigkeit $v = 170$ bis 210 m/µs, eine Ladung $q_2 = 470$ bis 380 µC/m und ein Durchmesser $2r_2 = 17$ bis 13,7 m.

Eine wider Erwarten große Anzahl von Überschlügen in Höchstspannungsleitungen, die nur durch direkte Blitzeinschläge hervorgerufen sein können, veranlaßte *Griscom* [34], eine Theorie über den Kopf des Leitpfades aufzustellen, die wesentlich von bisherigen Anschauungen abweicht. Wenn der Kopf des Leitpfades eine unverhältnismäßig große Ladungsmenge enthält, so wird bei einem Einschlag diese Ladung eine kurzzeitige hohe Stromspitze zur Folge haben, die dem eigentlichen Blitzstrom vorausgeht.

Zur Erläuterung mögen folgende Zahlen dienen. Bei einer Ladung des Leitpfades von 1250 µC/m entsprechend einem Blitzstrom von 125 kA bei 100 m/µs Geschwindigkeit berechnet *Griscom* eine Kopfladung von 127 mC, konzentriert in einer „Kugel“ von 50 m Dmr. bei einem Kopfpotential von 75 MV und einer elektrischen Feldstärke von 3 MV/m = 30 kV/cm am Rande des Kopfes. Bild 6 zeigt die Annäherung dieses Leitpfades in 100 m Abstand von Erde an einen 50 m hohen Hochspannungsmast. Für eine Fangentladung von 50 m Länge errechnet *Griscom* eine Zeitkonstante des Stromanstieges von 0,07 µs und erhält ein Potential des Mastkopfes von 7,5 MV während einer Dauer von etwa 0,3 µs. Hierbei ist mit einem Wellenwiderstand des Entladekanals von 350 Ω, des Mastes von 130 Ω und des Erdseiles von 200 Ω gerechnet. Der Strom dieses Blitzvorläufers ist größer als der Blitzstrom. Da er nur von der Entladung des Leitpfadkopfes herrührt und sich kapazitiv über diesen zum geschlossenen Stromkreis schließt, ist er räumlich stark begrenzt. Bei einer Anstiegsgeschwindigkeit von 1000 kA/µs müßte sich die Anwesenheit eines solchen Blitzvorläufers durch eine starke elektromagnetische Strahlung kundtun.

Das elektrische Feld

Über die Größe der elektrischen Feldstärke bei Gewittern herrschte viele Jahre große Unklarheit, die sich auch in neueren Angaben widerspiegelt. Die Hochspannungstechnik hatte bereits vor vielen Jahrzehnten großes Interesse daran, konkrete Zahlenangaben über die elektrische Feldstärke des Gewitters zu erhalten. *W. Petersen* hielt 20 kV/m für einen Höchstwert [36], als er im Jahre 1914 den Schutzwert von Erdseilen berechnete. Zehn Jahre später hielt *F. W. Peek*

an der Ansicht fest, daß die elektrische Feldstärke zwischen Wolke und Erde für einen Blitzeinschlag 330 kV/m betragen müsse, und daß die induzierte Spannung je Leitungshöhe auf einer Leitung bis 165 kV/m betragen könne [37]. Messungen von *Norinder* schienen die Größenordnung dieser Werte zu bestätigen. In den Jahren 1918 bis 1920 hat er aus Messungen auf Feldstärken über 100 kV/m bei Gewitterwolken im Abstand bis etwa 4 km geschlossen und 16 Jahre später auf induzierte Überspannungen von 400 kV auf einer einseitig geerdeten Versuchsleitung von 12,5 km Länge und 7,5 m Höhe bei Blitzschlag in etwa 1 km Abstand [38, 39].

Diese Angaben über so große Feldstärken haben sich nicht bestätigt. Bei einigen Nahgewittern hat der Verfasser dieser Arbeit Blitzeinschläge in 400 bis 200 m Abstand festgestellt, ohne daß die elektrische Feldstärke an der Erde höhere Beträge als 3 bis 5 kV/m hatte. Werte über 10 kV/m auf der Erde unter Gewitterwolken sind sehr selten, und zwar aus folgendem Grund. Das Gewitterfeld wird durch Raumladungen abgeschirmt. Von allen Spitzen, an denen sich das elektrische Feld konzentrieren kann, fließt im positiven elektrischen Feld, also bei negativem Gradienten, ein positiver Strom als Koronaentladung in die Atmosphäre. Dieser Vorgang hat eine wesentliche Bedeutung für die Auslösung und die Beeinflussung eines Blitzes, so daß hierauf näher eingegangen sei. Bild 7 gibt eine Übersicht über die Größe des Stromes in Abhängigkeit von der Feldstärke \mathcal{E} im homogenen Feld, der aus Spitzen verschiedener Höhe h ausströmt. Diese Angaben sind experimentell im Laboratorium gewonnen (Kurven 5 bis 8) und für einen 8,4 m hohen Mast durch Messungen und Berechnungen von *Chalmers* (Kurve 1) ergänzt worden [40]. Die Grenzfeldstärke \mathcal{E} , bei welcher der positive Strom von dem kleinen durch die Leitfähigkeit der Luft und die Kapazität der Anordnung gegebenen Wert auf den Koronastrom springt, folgt empirisch aus der Beziehung

$$\mathcal{E} = 3,5 \{h\}^{-0,7} \quad (4)$$

In dieser Zahlenwertgleichung ergibt sich \mathcal{E} in Kilovolt je Meter, wenn h in Meter eingesetzt wird. Bei einer 1 m hohen Spitze ist hiernach die Grenzfeldstärke 3,5 kV/m, bei einer 10 m hohen Spitze dagegen 0,7 kV/m.

Leider sind Angaben der Feldstärke, die aus Messungen des Koronastromes gewonnen sind, sehr ungenau und un-

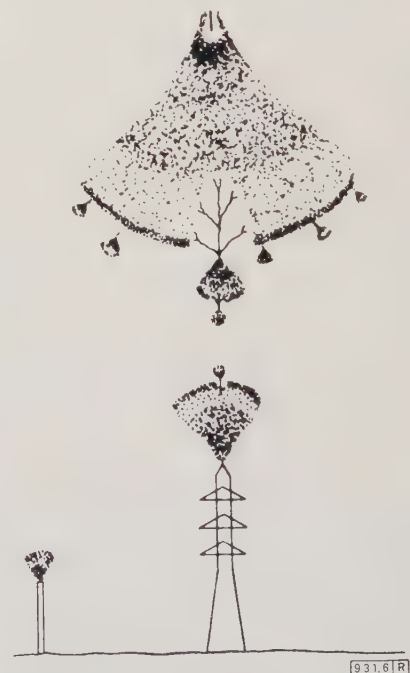


Bild 6. Annäherung des Leitpfades an einen Hochspannungsmast (nach S. B. Griscom). Erläuterungen im Text.

sicher. Wind und Raumladungen der Umgebung beeinflussen die Messung merklich [41]. Die für Spitzen von 27 m und 34 m Höhe in Bild 7 wiedergegebenen Werte der elektrischen Feldstärke gelten als Beispiel für die Verhältnisse bei Wind von 6,5 m/s Geschwindigkeit (Kurven 3 und 4). Außerdem sind in Bild 7 einige Meßpunkte eingetragen, die sich bei einer vom Verfasser verwendeten 15,5 m hohen Spitzenanordnung ergaben.

Schon vor über 70 Jahren hatte Weber versucht, die von isoliert aufgestellten Bäumen ausströmenden Spitzenentladungen zu messen [42]. Seit dieser Zeit sind viele Forschungsarbeiten über luftelektrische Spitzenentladungen bis in die jüngste Zeit durchgeführt worden. Die Raumladungen in der Luft verteilen sich oftmals so weitläufig, daß sie auf viele Kilometer Ausdehnung die statische Gewitterfeldstärke am Erdboden herabsetzen. Aus Untersuchungen von Lutz [43]

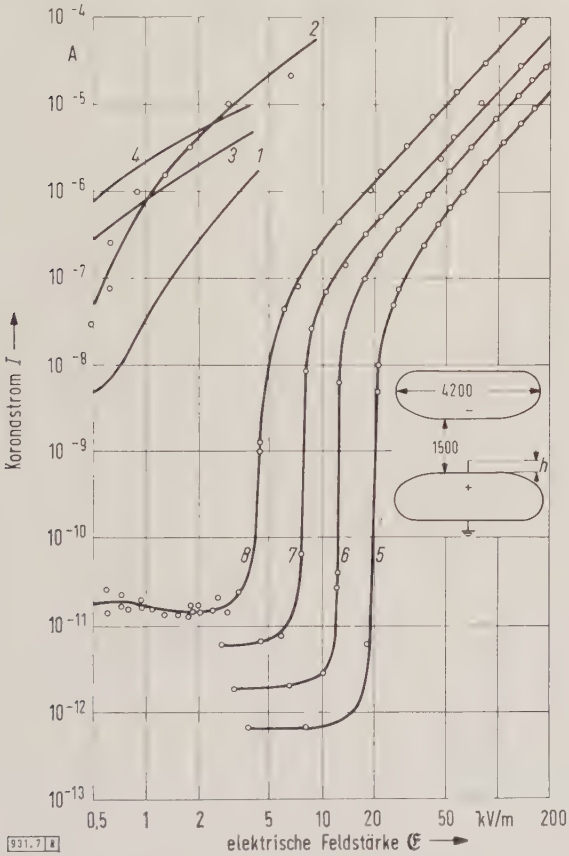


Bild 7. Koronastrom I von Spitzenentladungen in homogenem Feld, abhängig von der elektrischen Feldstärke \mathcal{E} .

Messungen im luftelektrischen Feld	Spitze mit der Höhe h	Messungen im Laboratorium	homogenes Feld (Bild rechts Mitte) mit Spitze der Höhe h
Kurve	m	Kurve	mm
1	8,4	5	90
2	15,5	6	175
3	27	7	360
4	34	8	720

über die Raumladung ergeben sich Werte von etwa 0,5 bis 1,7 C/km³ und demnach in einem in Betracht kommenden Raum von 10 bis 30 km³ positive Raumladungen von 5 bis 50 C.

Die Mehrzahl der positiven Raumladungen schwächt das Gewitterfeld am Erdboden, nur ein kleiner Teil nimmt direkten Einfluß auf den Blitzablauf. In einer Wolke, wie sie ein Radarbild (Bild 8) für einen sehr kräftigen „Gewitterturm“ in Ohio (USA) zeigt [44], sind positive Ladungen vorherrschend in Höhen über 8 km mit Tempe-

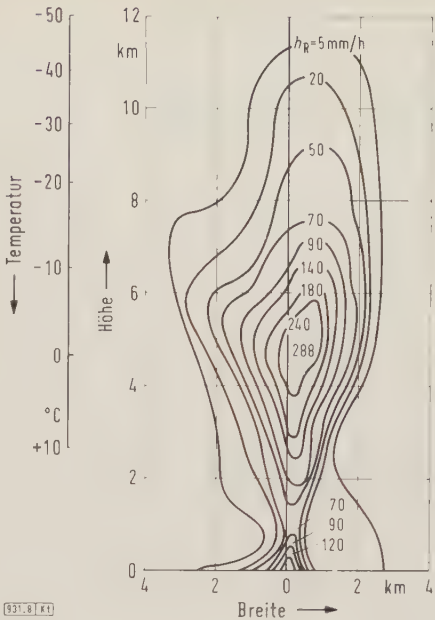


Bild 8. Radarbild eines „Gewitterturmes“ mit Kurven gleicher Regenstärke h_R .

raturen unter $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, negative Ladungen überwiegen in der Wolke bis 6 oder 8 km Höhe und positive Raumladungen bis zu Höhen von 2 oder 3 km. Sie werden von den Aufwinden hochgetragen und stammen am „vorderen“ Teil der Wolke, vom Aufwind aus gesehen, hauptsächlich von Korona-Entladungen am Erdboden her, im Niederschlagsgebiet teils vom Wasserfalleffekt und teils von Umladungen und Aufladungen im Raume zwischen Wolke und Erde mit positiver elektrischer Feldstärke, also mit negativem Gradienten. In der Wolke hat man mit positiven und negativen Ladungen von 30 bis 1000 C zu rechnen. Meist wird nur ein kleiner Anteil durch Blitze ausgeglichen.

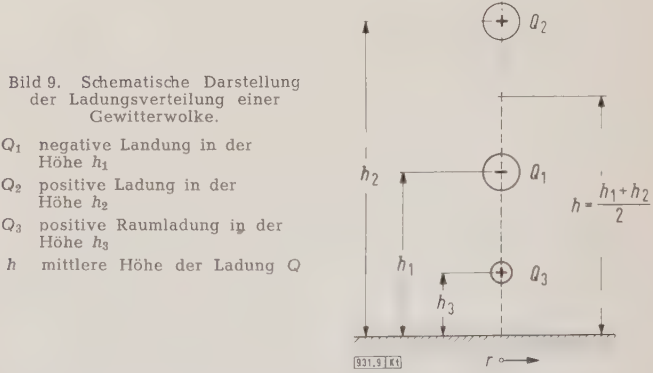


Bild 9. Schematische Darstellung der Ladungsverteilung einer Gewitterwolke.

- Q_1 negative Ladung in der Höhe h_1
- Q_2 positive Ladung in der Höhe h_2
- Q_3 positive Raumladung in der Höhe h_3
- h mittlere Höhe der Ladung Q

Legt man die schematisch in Bild 9 dargestellte Ladungsverteilung zugrunde, so erhält man mit den Bezeichnungen dieses Bildes die elektrische Feldstärke \mathcal{E} am Erdboden in einem auf die mittlere Höhe h bezogenen Abstand r für eine Ladung Q zu:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{h^2} \cdot \frac{1}{n^3} \left[\left(\frac{m_1}{n} \right)^2 + 1 \right]^{3/2} - \left[\left(\frac{m_2}{n} \right)^2 + 1 \right]^{3/2} - \left[\left(\frac{m_3}{n} \right)^2 + 1 \right]^{3/2} \right]$$

(5)

In Gl. (5) ist

$$\frac{1}{2\pi\epsilon_0} = 18 \cdot 10^9 \frac{\text{Vm}}{\text{As}}$$

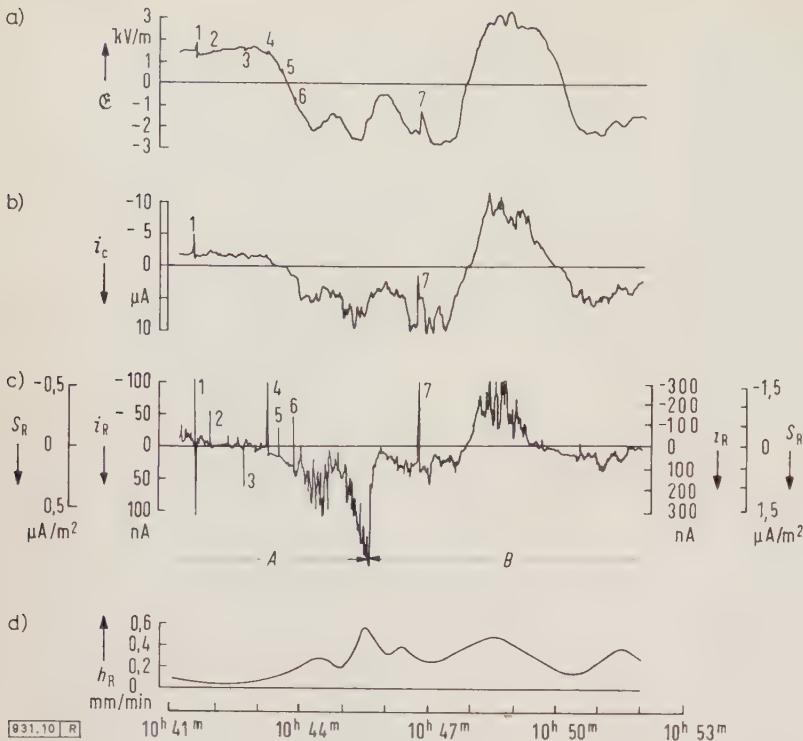


Bild 10. Registrierung a) der elektrischen Feldstärke, b) des Koronastromes, c) des Regenstromes und d) der Regenstärke einer kräftig geladenen Gewitterwolke. Im Teilbild c) wurden zwei Meßbereiche verwendet, nämlich A entsprechend der linken Skalenteilung und B entsprechend der rechten Skalenteilung. Die Zahlen 1 bis 7 deuten Feldsprünge bzw. Beeinflussung der Strommessung durch Blitzentladungen an.

ferner mit den Bezeichnungen nach Bild 9

$$n = \frac{r}{h}, \quad m_1 = \frac{h_1}{h}, \quad m_2 = \frac{h_2}{h} = \frac{2h - h_1}{h} = 2 - m_1, \\ m_3 = \frac{h_3}{h} \text{ und } u_3 = \frac{Q_3}{Q}.$$

Senkrecht unter der Wolkenmitte ($r = 0, n = 0$) ist die elektrische Feldstärke am Erdboden nach Gl. (5)

$$\mathcal{E}_0 = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{h^2} \left(\frac{1}{m_1^2} - \frac{1}{m_2^2} - \frac{u_3}{m_3^2} \right) \quad (6)$$

oder

$$\mathcal{E}_0 = 18 \cdot 10^9 \frac{\text{Vm}}{\text{As}} \cdot \frac{Q}{h^2} \left(\frac{1}{m_1^2} - \frac{1}{m_2^2} - \frac{u_3}{m_3^2} \right). \quad (6a)$$

Für $Q = 300 \text{ C} = 300 \text{ As}$, $h = 6 \text{ km}$ und $m_1 = 0,7$, d.h. für ein Zentrum der negativen Ladung Q_1 in $h_1 = 0,7 \cdot 6 \text{ km} = 4,2 \text{ km}$ Höhe und ein Zentrum der positiven Ladung Q_2 in $h_2 = 1,3 \cdot 6 \text{ km} = 7,8 \text{ km}$ Höhe würde die Feldstärke am Erdboden unter der Wolke $\mathcal{E} = 217 \text{ kV/m}$ betragen, wenn man von dem der positiven Raumladung zuzuschreibenden dritten Klammerglied in Gl. (6) und (6a) absieht. Tatsächlich wird das elektrische Feld durch die positive Raumladung fast ausgelöscht und höchstens etwa auf 10 kV/m begrenzt. Hierzu ist für das eben angegebene Zahlenbeispiel eine positive Raumladung von $Q_3 = 12,08 \text{ C}$ in $h_3 = 1 \text{ km}$ Höhe nötig. Nur in Gegenden mit Mangel an Spitzenentladungen, z.B. im Hochgebirge und über dem Meer, ist mit größeren elektrischen Feldstärken als 10 kV/m zu rechnen, die dann zu stattlichen Sankt-Elmsfeuern Anlaß geben.

Unter der negativen Wolke ist der Potentialgradient negativ, die Feldstärke also positiv. Die positiven, auf geerdeten Teilen gebundenen Ladungen werden frei, wenn ein Blitz negative Ladung nach Erde transportiert. In einem bestimmten Abstand vom Ladungszentrum entsprechend Bild 9 wird die Feldstärke Null. Der Abstand ergibt sich durch Nullsetzen des Klammerausdruckes in Gl. (5) und ist $r \approx 1,3 h$, also $7,8 \text{ km}$ in dem oben gewählten Zahlenbeispiel. Bei einem größeren Abstand überwiegt der Einfluß

der höher gelegenen positiven Gewitterladung, die elektrische Feldstärke an der Erde wird negativ. Bei einem Erdblitz, durch den die negative Gewitterladung geschwächt wird, verstärkt sich die negative Feldstärke. Die negativen gebundenen Ladungen auf geerdeten Teilen, z.B. einer geerdeten Antenne, werden verstärkt, und der Antenne fließt ein negativer Strom von der Erde aus zu oder, was auf dasselbe herauskommt, ein positiver Strom fließt von der Antenne nach Erde. Bei fernen und bei nahen Erdblitz werden positive Spannungen auf der Antenne induziert. Diese Erscheinung findet bei Blitzzählern praktische Anwendung.

Die durch Gl. (5) und (6) schematisch angegebenen Zusammenhänge haben idealisierte Voraussetzungen, die in der Natur nur selten vorkommen. Örtliche Raumladungsfelder stören ganz erheblich, und kräftige Regenladungen können das Feldbild völlig verändern.

In Bild 10 ist der Ausschnitt aus einer Registrierung gezeigt, bei der die elektrische Feldstärke innerhalb von 56 min achtmal Null wurde und die Polarität wechselte. Bild 10 zeigt Aufnahmen eines Ferngewitters am 25. August 1959, und zwar die mit Feldmühle gemessene elektrische Feldstärke, den Koronastrom einer 15,5 m hohen Spitzenanordnung, bestehend auf 17 halbkugelförmig angeordneten Stahlspitzen von 2 m Länge, die auf eine Kugel von 50 cm Dmr. Ladungen, die den „Regenstrom“ angeben, schließlich die Regenstärke.

Um 10h war bei bedecktem Himmel die Temperatur $21,5^\circ \text{C}$; heftige Windböen mit Geschwindigkeiten von 4 bis 15 m/s , auf 8 m hohem frei stehendem Mast gemessen, und kräftige Ausschläge des an die 15,5 m hohen Spitzen angeschlossenen Strommessers (Meßbereich 10 nA) zeigten ein Ferngewitter in mehr als 15 km Abstand an. Die elektrische Feldstärke sank langsam von -170 V/m auf -300 V/m und erreichte dann 10 min später mit einer Geschwindigkeit von $-4,6 \frac{\text{V}}{\text{m}}/\text{s}$ einen Wert von -500 V/m . Noch war kein Donner zu hören. In West-West-Süd wurde der Himmel blauschwarz, 10h 25m kam der erste Donner, die Feldstärke stieg langsam und erreichte um 10h 31m den ersten Nulldurchgang mit einer Geschwindigkeit von $1,1 \frac{\text{V}}{\text{m}}/\text{s}$. Eine halbe Minute vorher leuchtete die Wolke hell auf. Ein Feldsprung von $+365 \text{ V/m}$ wurde gemessen, Donner war nicht hörbar. Aus den plötzlichen Feldstärkeänderungen kann man nach Gl. (5) die dabei vorhandenen Ladungen berechnen,

Tafel 3. Ergebnisse der Messungen der Regenelektrizität und anderer Erscheinungen bei einem schwach entwickelten Gewitter am 25. August 1959 in Uppsala.

Zeit	Regenelektrizität		Regenmenge l/m²	Regenstärke mm/min	Elektrizitätsmenge je Liter Regenfall μC/l	Regenstromdichte μA/m²
	positiv μC/m²	negativ μC/m²				
10h 42m 42s	—	— 29	0,46	0,081	— 63	0,085
10h 47m 45s	+95	—	1,18	0,234	+ 80	0,312
10h 49m 20s	—	— 65	0,57	0,356	—114	0,68
10h 56m 06s	+48	—	0,79	0,119	+ 61	0,12
11h 13m 36s	—	—167	1,47	0,089	—114	0,17
11h 17m 20s	+18	—	0,12	0,032	+150	0,08
11h 24m 30s	—	— 5	0,02	0,008	—250	0,033
	Summe +161	Summe —266				

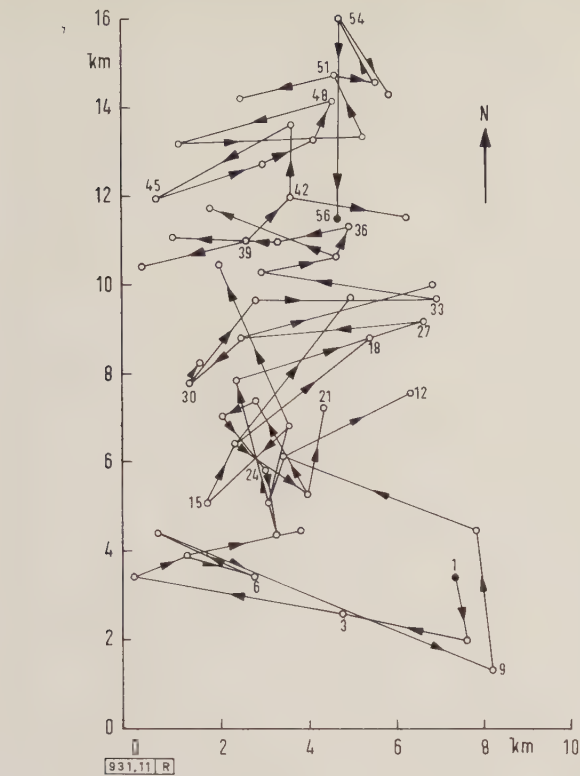


Bild 11. Einschlagstellen des Blitzes bei einem Gewitter kleineren Umfanges in Holland; 56 Erdblitzes in einem Gebiet von 119 km², erster Blitz 16^h 45^m, letzter Blitz 17^h 11^m (nach Feteris). Die Zahlen bedeuten die zeitliche Reihenfolge, die Pfeile die Richtung aufeinanderfolgender Blitze.

wenn man gleichzeitig in mehreren Stationen mit einem gegenseitigen Abstand von einigen Kilometern die Feldsprünge mißt, wie dies Reynolds und Neill [25] getan haben. 6 min später, 10^h 37^m, betrug die Feldstärke + 630 V/m, die Temperatur war auf 17 °C gefallen, die ersten Regentropfen kamen, und die Koronaspitzen emittierten einen Strom von 0,31 µA, der um 10^h 39^m 15^s auf 3 µA bei einer Feldstärke von + 1,9 kV/m anstieg. Den weiteren Verlauf zeigt Bild 10 ab 10^h 41^m. Bis zu diesem Zeitpunkt war 0,36 mm Regen gefallen.

Um 10^h 43^m kamen schwere positiv geladene Tropfen und veränderten das Feldbild vollständig, mit 60 $\frac{\text{V}}{\text{m}}$ Geschwindigkeit ging die Feldstärke durch Null, erreichte - 2,5 kV/m im Augenblick heftigsten Regens (0,47 mm/min

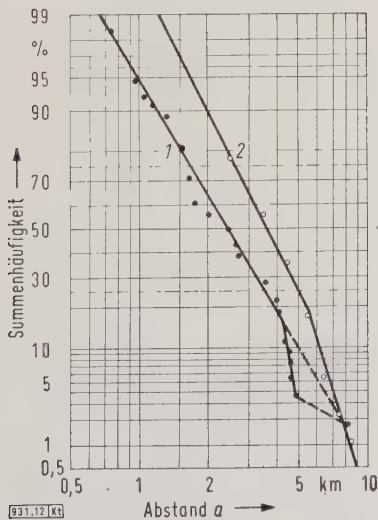


Bild 12. Summenhäufigkeit des Abstandes a aufeinanderfolgender Blitzentladungen.
1 Messungen von Feteris 2 Messungen von Hatakeyama

um 10^h 47^m), ging dann erneut durch Null, als negativ geladener Regen fiel, erreichte + 3 kV/m mit einer Geschwindigkeit von $212 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ (10^h 48^m 25^s), wurde wieder negativ im Takte mit positivem Regen und erreichte um 10^h 55^m 30^s als zweites Minimum - 4,15 kV/m. Der Regen wechselte erneut seine Polarität. Um 10^h 56^m 45^s war die Feldstärke gleich Null und erreichte mit $240 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ Geschwindigkeit einen Wert von + 7 kV/m bei einem Koronastrom von 18 µA (10^h 58^m) als den absolut höchsten Wert der Feldstärke. Bis zu diesem Zeitpunkt, also in 21 min, war insgesamt 3,46 mm Regen gefallen. Um 11^h 14^m wurde die positive Polarität im Regen vorherrschend, um 11^h 15^m ging die Feldstärke zum sechsten Mal durch Null.

Tafel 3 gibt ein zusammenfassendes Bild der bedeutenden Elektrizitätsmengen, die bei diesem Gewitter mit nur wenigen Entladungen zur Erde transportiert wurden.

Die positiven Raumladungen in der Wolke verstärken das elektrische Feld so, daß oftmals die Blitzentladung an der Grenze zwischen positiver und negativer Raumladung ihren Anfang nimmt. Die Entladung wird dort „getriggert“. Sie umfaßt ein Raumgebiet innerhalb einer Gewitterzelle mit einer Abmessung von mehreren hundert bis einigen tausend Metern. Nach dieser Entladung folgt die nächste Zelle, die oftmals einige Kilometer entfernt liegt. So kommt es, daß zwei aufeinanderfolgende Blitzentladungen selten näher als 1 km voneinander entfernt auftreten. In Bild 11 sind Messungen von Feteris [44] wiedergegeben,

Tafel 4. Abstand aufeinanderfolgender Blitzentladungen.

Häufigkeit	%	schwächeres	stärkeres
		Gewitter	
		km	km
unteres Quartil	75	1,7	2,6
Medium	50	2,4	3,7
oberes Quartil	25	3,5	5
oberes Dezil	10	4,4	6,2

durch die bei einem Gewitter kleineren Umfanges in der Nähe von Scheveningen (Holland) mit Hilfe von 20 Beobachtern, die in einem Gebiet von etwa 200 km² stationiert waren, 56 Blitze nach Erde lokalisiert werden konnten. Aus der Summenhäufigkeit dieser Messungen sowie aus ähnlichen Feststellungen, die Hatakeyama in Japan (Bild 12) bei einem ungleich stärkeren Gewitter machte [26], ergeben sich die in Tafel 4 niedergelegten Zahlen.

In 50 % der zu erwartenden Fälle ist also der Abstand eines Blitzes nach Erde von dem vorausgegangenen Blitz gleich oder größer als 2,4 km bei einem schwächeren, 3,7 km bei einem stärkeren Gewitter.

Die Auslösung eines Blitzes durch positive Raumladungen kann auch von der Erde ausgehen, wenn kräftige Koronastrome von sehr hohen Spitzen fließen. Bei günstigen Aufwinden können sie entweder auf viele hundert Meter einen Blitz „zu sich hinziehen“ oder einen Blitz starten (Bild 13). Die Folge davon ist, daß die Häufigkeit des Einschlages in hohe Objekte etwa quadratisch mit deren Höhe ansteigt [28] und die Trefferwahrscheinlichkeit nicht mehr von dem nahe der Erde auftretenden Ruckstufenprozeß bestimmt wird. Eine weitere Folge der Auslösung von der Erde aus sind langdauernde Ströme; schwache Blitzströme von sehr langer Dauer stellt man oft fest. Ein ausgezeichnetes Beispiel zeigt Bild 20. Im Augenblick der Blitzbildung ist die Ladungserzeugung und Ladungstrennung in der Wolke noch nicht zu den hohen, für rasche Entladung notwendigen Feldstärken angewachsen. Der Blitz wird „zu früh“ ausgelöst.

Die positiven, am und im unteren Wolkensaum befindlichen Ladungen spielen also für den Blitzablauf eine wichtige Rolle. Sie beeinflussen den Leitpfad-Prozeß und dessen Vorwachsengeschwindigkeit, sie schirmen die Erde gegen-

über hohen Feldstärken ab, sie lösen die in einem Gewitter aufeinanderfolgenden Blitze in etwa 2 bis 6 km Abstand aus, sie erhöhen die Trefferwahrscheinlichkeit hoher Objekte, bei denen öfters Entladungen von Wolken mit schwachen, langdauernden Strömen beobachtet wurden.

Die induzierten Überspannungen

Die Ladungen, die mit einer Geschwindigkeit von einigen Dezimetern je Mikrosekunde in Richtung zur Erde im vorwachsenen Leitpfad transportiert werden, erzeugen ein quasistatisches elektrisches Feld, das sich leicht berechnen läßt. In der Nähe der Erde schlägt die Fangentladung entgegen. Die Kurven in Bild 14 zeigen die elektrische Feldstärke in einem Abstand von 50 m bis 5 km von dem Ort unterhalb des Leitpfades, an dem eine Feldstärke von 250 kV/m auftritt. Die spezifischen Ladungen, die der Rechnung zugrunde liegen, entsprechen einer mittleren Geschwindigkeit des zurückschlagenden Blitzes gemäß Gl. (3). Die Länge der Fangentladung ist 10 m bis 50 m für Ladungen, die Blitzen mit 5 bis 100 kA Stromstärke entsprechen. Die Feldstärke ist größer als 10 kV/m, wenn der Abstand des Blitzes von einem Meßpunkt kleiner als 800 m für Blitze mit Stromstärken von 100 kA und kleiner als 210 m

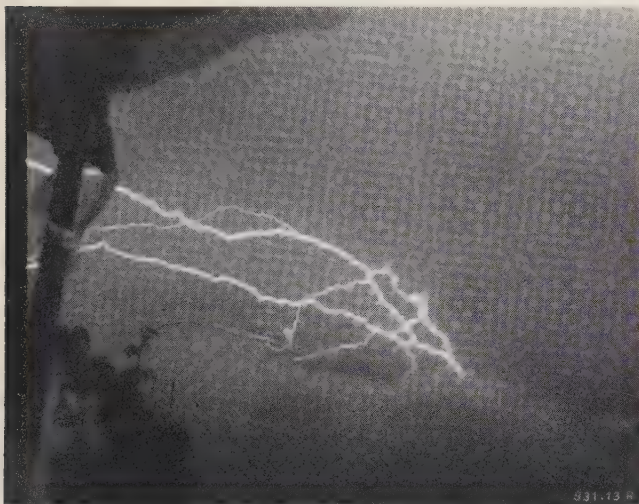


Bild 13. Blitzeinschlag am Monte San Salvatore bei Lugano am 8. Juli 1960 um 21^h 16^m 28^s.

für solche mit Stromstärken von 5 kA ist. Nur bei solchen verhältnismäßig selten vorkommenden Blitzen treten hohe Feldstärken im Abstand von einigen hundert Metern von der Einschlagstelle auf.

Um die relative Häufigkeit dieser Feldstärken in einem begrenzten Gebiet, wie es einem Wärmegewitter entspricht, zu bestimmen, seien die AIEE-Werte für den Blitzstrom nach Tafel 2 und die Werte für I_2 nach Bild 4 zugrunde gelegt. Dabei sei angenommen, daß die Wahrscheinlichkeit für einen Blitztreffer und für die Häufigkeit der Ströme überall gleich groß ist. Der Abstand der Einschläge für ein „nahes Gewitter“ sei auf 5 km begrenzt, und für dieses Gebiet von knapp 80 km² Fläche soll untersucht werden, wie häufig hohe elektrische Feldstärken dort auftreten. Nach Bild 15 ist bei einer Summenhäufigkeit von 2,5 % die Feldstärke gleich oder größer als 2,75 kV/m für einen Punkt und gleich oder größer als 25 kV/m für einen 10 km langen Abschnitt einer Leitung. In gewitterreicher Gegend mit etwa 20 Gewittertagen je Jahr rechnet man mit zwei Blitzeinschlägen je Quadratkilometer, also mit 160 Einschlägen je Jahr in einem Gebiet von 80 km². Bei einem von 40 Blitzen wird die elektrische Feldstärke die vorerwähnten Werte überschreiten. Für geringere Summenhäufigkeiten gibt Tafel 5 einige Werte der elektrischen Feldstärke. Eine Summenhäufigkeit von z.B. 10⁻³ bedeutet, daß bei einem von 10³ Blitzen die angegebenen Feldstärken erreicht oder über-

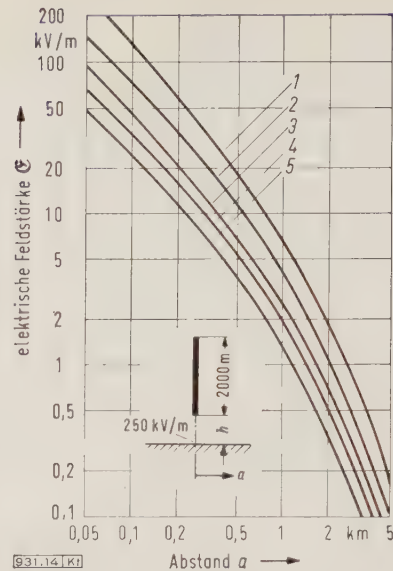


Bild 14. Quasistatische Feldstärken des Leitpfades in Abhängigkeit vom Abstand a des Blitzeinschlagortes.

Kurve	Blitzstrom kA
1	100
2	50
3	20
4	10
5	5

schritten werden. Bei einer 100 km langen, durch gewitterreiches Gebiet führenden Leitung ergeben sich nach dem obigen Zahlenbeispiel jährlich 1600 Einschläge in einem Abstand bis 4 km von der Leitung. 1,6-mal im Jahresdurchschnitt wird der Fall eintreten, daß die elektrische Feldstärke in Leitungsnähe 145 kV/m erreichen oder überschreiten wird bei Blitzen in 85 m Entfernung von der Leitung oder näher davon.

Diese hohen Feldstärkensprünge entstehen „langsam“, gemessen im Mikrosekunden-Maß, nämlich innerhalb 3000 bis 30 000 µs. Auf längeren Leitungen fließen die induzierten Ladungen ab, ohne daß ihre Existenz sich durch Überspannungen offenbart. Mit Entstehen des Blitzkanales verschwindet das Feld rasch. Innerhalb 5 bis 20 µs werden mehr als 80 % der gebundenen Ladungen bei einem nahen Blitzschlag frei. Auf einer langen Freileitung werden Überspannungen induziert. Die Spannung ist wesentlich kleiner als das als Produkt aus Feldstärke und Leitungshöhe errechnete Potential, das eine hoch isolierte Antenne annehmen würde. Denn das Gebiet hoher Feldstärke in der Nähe der Blitzbahn ist räumlich so begrenzt, daß die hier frei werdenden

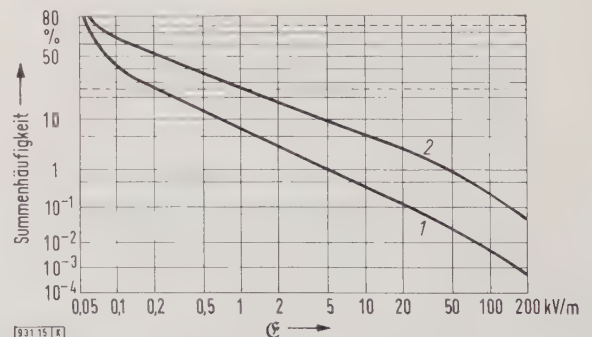


Bild 15. Summenhäufigkeit des Feldstärkesprungs bei einem Nahgewitter in einem Gebiet von rd. 80 km².

Kurve 1 Feldstärke an einem Punkt in der Mitte des Gebietes
Kurve 2 Feldstärke an einer Leitung durch das Gebiet

Tafel 5. Wahrscheinlichkeit für das Auftreten sprunghaft hoher elektrischer Feldstärken bei nahem Gewitter und bei Blitzströmen bis 100 kA in einem Gebiet von 80 km².

Summenhäufigkeit	elektrische Feldstärke an		größter Abstand des Blitzes von	
	einem Punkt \geq kV/m	einer Linie \geq kV/m	einem Punkt m	einer Linie m
10 ⁻²	5,25	47,5	1300	230
10 ⁻³	22,5	145	430	85
10 ⁻⁴	77	250	150	50
10 ⁻⁵	165	250	80	50

Ladungen sich 2- bis 10-mal rascher fortpflanzen als der induzierende Blitzkanal sich nach oben entwickelt. Die mathematische Theorie der vom Blitzstrom induzierten Überspannungen ist von C.F. Wagner, McCann und Mitarbeitern [46, 47], R. Lundholm [32, 48] und S. Rusk [33] ausgebaut worden, nachdem V. Aigner bereits im Jahre 1935 den Induktionseffekt eines vertikalen Blitzstromes untersucht hatte [49]. Näherungsweise beträgt hiernach der Maximalwert der induzierten Überspannung auf einer langen, geraden Leitung von der Höhe h bei Einschlag des Blitzes im Abstand r [33]:

$$U_{\max} = \frac{30 I h f}{r} \quad (7)$$

In dieser Zahlenwertgleichung ergibt sich U_{\max} in kV, wenn der Blitzstrom I in kA, der Abstand r in m und der Faktor f im Bereich zwischen 1,07 und 1,38 eingesetzt wird, je nachdem die Wachstumsgeschwindigkeit des Blitzes, bezogen auf die Lichtgeschwindigkeit, im Bereich $v/c = 0,1$ bis 0,5 variiert.

Ein Blitz von 50 kA Stromstärke induziert demnach in 50 m Abstand auf einer 7 m hohen Leitung bei $f = 1,38$ eine Überspannung von 290 kV und ein Blitz von 20 kA Stromstärke in 300 m Abstand bei $f = 1,1$ eine Überspannung von 15,4 kV. Die Zahl der Leitungsüberschläge durch direkte Einsläge ist größer als die durch indirekte Überspannungen, wenn die Überschlagstoßspannung der Leitung größer als etwa 300 kV ist. Nur Blitze dicht neben der Leitung können solche Spannungen induzieren. Hiermit hat sich die von A. Matthias im Jahre 1929 veröffentlichte Feststellung über die überwiegende Bedeutung direkter Blitzeinschläge in Leitungen von 60 kV Betriebsspannung und darüber bestätigt [50].

Die elektrische Feldstärke im Abstand r von der Blitzbahn kann berechnet werden, wenn man sich zur mathematischen Behandlung den Blitzstrom aus Stromoberschwingungen zusammengesetzt denkt [48]. Diese allerdings etwas umständliche Methode gestattet, Aussagen über die elektrische Feldstärke vor allem in unmittelbarer Nähe der Blitzbahn zu machen, wo die seit 1926 von Appleton [21] in die Gewitterforschung eingeführte vereinfachte Hertzsche Dipolgleichung versagt. Für einen Dipol mit dem Strommoment $M = 2 I h$, wobei I der Strom und h der halbe Dipolabstand ist, gilt für die elektrische Feldstärke im Abstand r und in Richtung der Dipolachse

$$\mathcal{E} = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \left[\frac{1}{r^3} \int M dt + \frac{M}{c r^2} + \frac{1}{c^2 r} \frac{dM}{dt} \right] \quad (8)$$

Rechnet man mit einem zeitlich harmonisch schwingenden Dipol, so ist der Absolutbetrag jedes der drei Glieder nach Gl. (8) gleich für einen Abstand vom Dipol $r_0 = c/\omega_0$ mit $\omega_0 = 2 \pi f_0$ als Kreisfrequenz bei einer Frequenz f_0 . Für eine Frequenz $f_0 = 20$ kHz, die typisch für die Abstrahlung vom Blitzkanal ist, wird dieser Abstand $r_0 = 2,387$ km. Für eine Frequenz $f_0 = 700$ Hz, die man als typisch für die Änderung des elektrischen Feldes der Wolke bei einem Erdblick ansehen kann, wird der Abstand $r_0 = 68,2$ km. Im Abstand kleiner als r_0 überwiegt in Gl. (8) das erste, nämlich das elektrostatische Glied. Für die Frequenz $f_0 = 700$ Hz ist demnach das elektrostatische Glied in 6,82 km Abstand vom Ent-

stehungsort $10^3 = 1000$ -mal größer als in dem 10-fach größeren Abstand, von wo ab das dritte, nämlich das Strahlungsglied, überwiegt. Die Amplitude dieser extrem langwelligen Strahlung ($f_0 = 700$ Hz, Wellenlänge 428,6 km) ist jedoch außerordentlich niedrig.

Die magnetische Induktion \mathfrak{B} , die zirkular in der Symmetrieebene schwingt, ist gegeben durch den Ausdruck

$$\mathfrak{B} = \frac{\mu_0}{4 \pi} \left(\frac{M}{r^2} + \frac{1}{c r} \cdot \frac{dM}{dt} \right) \quad (9)$$

Hierin ist

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs A}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

die Induktionskonstante.

Für einen Dipol, dessen Strommoment M nach der einfachen Exponentialfunktion

$$M = 2 I h = 2 I_0 h_0 (e^{-t/t_1} - e^{-t/t_2}) \quad (10)$$

ansteigt bzw. abfällt, seien folgende Annahmen gemacht. Der Strom I möge sehr rasch, z. B. innerhalb $1 \mu\text{s}$ auf seinen Höchstwert ansteigen und langsamer abfallen entsprechend

$$I = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \quad (11)$$

wobei $\alpha = 2 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ und $\beta = 2 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ sei.

Die Länge h der vertikalen Blitzbahn möge entsprechend der Geschwindigkeit v , mit welcher der Blitzkanal wächst, und die exponentiell mit der Zeit abnimmt, folgendem Gesetz gehorchen:

$$h = v_0 t_k (1 - e^{-t/t_k}), \quad (12)$$

worin v_0 die Geschwindigkeit am Anfang des Vorganges ist.

Hiermit ergibt sich für die Zeitkonstante t_1 nach Gl. (10) folgender kombinierter Ausdruck:

$$\frac{1}{t_1} = \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_k} = \frac{1}{t_2} \left(1 + \frac{t_2}{t_k} \right) \quad (13)$$

t_2 ist identisch mit $1/\beta$ nach Gl. (11). Rechnet man z. B. mit $t_2 = 50 \mu\text{s}$, $t_k = 33,3 \mu\text{s}$ und demnach mit $t_1 = 20 \mu\text{s}$, so erreicht das Strommoment nach Gl. (10) sein Maximum etwa nach $30 \mu\text{s}$.

Die Kraftflußdichte (magnetische Induktion) ist unter diesen Voraussetzungen

$$\mathfrak{B} = \frac{\mu_0}{4 \pi} \cdot \frac{2 I_0 h_0}{r^2} \cdot e^{-t/t_2} \left[e^{-t/t_k} \left(\frac{r}{c t_1} - 1 \right) - \left(\frac{r}{c t_2} - 1 \right) \right] \quad (14)$$

Bei einem Abstand $r_1 = c t_1$, der bei dem gewählten Zahlenbeispiel 6 km beträgt, ist das erste Klammerglied gleich Null. Die Kraftflußdichte nach Gl. (14) spiegelt in diesem Sonderfall einen zeitlichen Verlauf wider, der dem zeitlichen Verlauf des Stromes nach Gl. (11) annähernd entspricht. Bei dem Abstand $r_2 = c t_2$, der bei dem gewählten Zahlenbeispiel 15 km beträgt, springt die Induktion, ähnlich wie bei dem Abstand r_1 , auf einen Höchstwert rasch an und fällt mit einer kombinierten Zeitkonstante ab. Allgemein gilt, daß der zeitliche Verlauf der Induktion nur im Ausnahmefall ein Spiegelbild des Stromverlaufes ist.

Die elektrische Strahlungsfeldstärke \mathcal{E}_s ist gegeben durch

$$\mathcal{E}_s = \frac{\mu_0}{4 \pi} \cdot 2 v_0 \cdot \frac{t_k}{t_2} \cdot \frac{I}{r} \cdot e^{-t/t_2} \left[\left(1 + \frac{t_2}{t_k} \right) e^{-t/t_k} - 1 \right] \quad (15)$$

Zur Erläuterung der bisher gebrachten Darstellung zeigt Bild 16 den zeitlichen Verlauf der elektrischen Feldstärke, aufgenommen an einer 5,3 m hohen und 11,4 m langen Horizontalantenne, deren Eigenfrequenz zu 6 MHz gemessen war. Der Abstand des Blitzes betrug etwa 9 km. Etwa 33,5 ms nach der Auslösung durch das erste von der entstehenden Blitzbahn ausgesendete Signal ist ein kurzzeitiger Impuls zu sehen. 1350 μs vor dem Eintreffen der

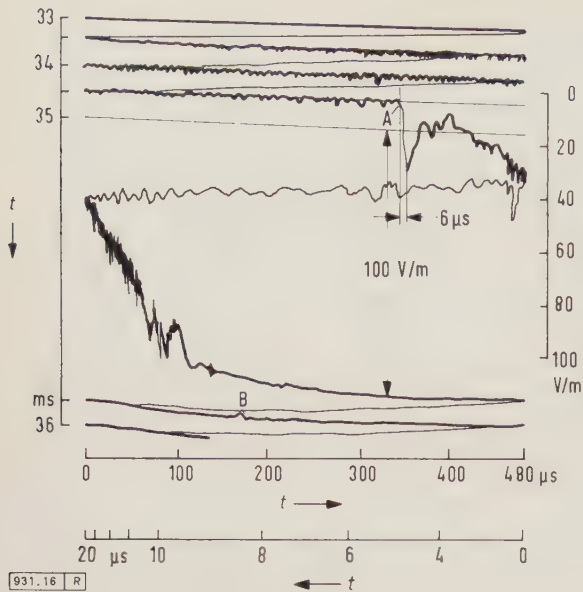


Bild 16. Zeitlicher Verlauf der elektrischen Feldstärke (erste Teilentladung) bei 9 km entferntem Blitzeinschlag am 7. Juli 1960 um 20^h 59^m 15^s. Erläuterungen im Text.

vom Blitz ausgesendeten Strahlung kann die Impulsfolge der Ruckstufen gemessen werden. Die Pausenlänge ist im Mittel $6,25 \mu\text{s}$ zu einem Zeitpunkt von etwa $1000 \mu\text{s}$ vor dem Eintreffen der Blitzstrahlung und $22 \mu\text{s}$ in den letzten $100 \mu\text{s}$. Dann springt die elektrische Feldstärke in $6 \mu\text{s}$ auf $26,5 \text{ V/m}$ (Punkt A im Oszillogramm von Bild 16), sinkt nach etwa $37 \mu\text{s}$ auf einen kleinen Wert und steigt, ausgehend von etwa 5 V/m , etwas langsamer auf 100 V/m . 90 % dieses Wertes werden nach $360 \mu\text{s}$ erreicht. Im Punkt B ist ein schwacher Reflex zu sehen. Der Zeitabstand zwischen A und B ist $825 \mu\text{s}$, entsprechend einer Reflexion an der Ionosphäre in 124 km Höhe. Eine Halbwellendauer von $37 \mu\text{s}$ entspricht einer Frequenz von $13,5 \text{ kHz}$. Diese rührt vom Strahlungsanteil des Feldes her. Eine Viertelwellendauer von $360 \mu\text{s}$ hingegen entspricht einer Frequenz von 700 Hz ; ein an die Antenne angeschlossener Blitzzähler, der besonders empfindlich auf Schwingungen mit Frequenzen von etwa 10 kHz bis 20 kHz abgestimmt ist, reagiert auf Strahlungsfelder. Deren Amplitude nimmt linear mit dem Abstand ab. Dagegen nimmt die elektrostatische Feldstärke, deren Änderungsgeschwindigkeit Frequenzen von etwa 500 bis 2000 Hz entspricht, ungefähr mit der zweiten bis dritten Potenz des Abstandes ab. Blitzzähler mit einem Filter, das auf etwa 500 bis 2000 Hz abgestimmt ist, haben infolgedessen eine schärfer begrenzte Reichweite.

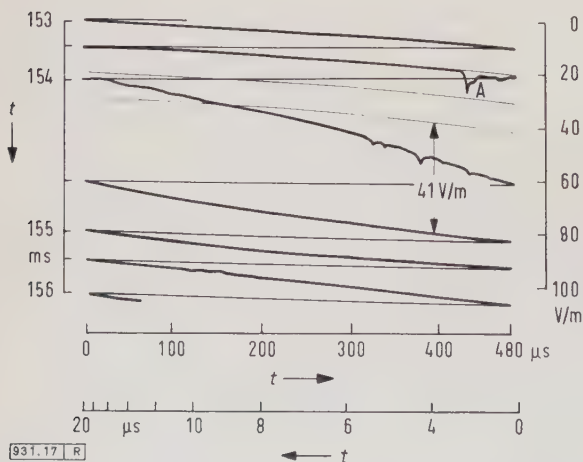


Bild 17. Zeitlicher Verlauf der elektrischen Feldstärke (zweite Teilentladung) bei 9 km entferntem Blitzeinschlag am 7. Juli 1960 um 20^h 59^m 15^s. Erläuterungen im Text.

119,07 ms nach dem ersten Blitz trat eine zweite schwächere Entladung auf (Bild 17). Auf dem Originalfilm sind schwache Impulse der Ruckstufen zu erkennen, etwa $400 \mu\text{s}$ vor dem Feldsprung in einer Folge von $4,1 \mu\text{s}$; 90 % der statischen Feldänderung werden nach $665 \mu\text{s}$ erreicht.

Messung der magnetischen Induktion

Die Notwendigkeit, zwischen Amerika und Europa die drahtlose Verbindung während des ersten Weltkrieges zu verbessern, veranlaßte L. W. Austin [51], mittels Rahmenantennen die atmosphärischen Störungszentren zu lokalisieren. Die drehbare Antenne hatte $9,2 \text{ m}$ Länge und $2,45 \text{ m}$ Höhe, mit 15 Drahtwindungen war ihre effektive Fläche 340 m^2 und damit genügend groß, so daß ohne Verstärker im Telefon hörbare Signale auf weite Entfernung empfangen werden konnten. Diese in Rahmenantennen induzierten Spannungen führte H. Norinder im Jahre 1933 den Platten des Kathodenstrahl-Oszillographen zu [52]. Da einige hundert Volt zur Ablenkung des Kathodenstrahles notwendig waren, betrug die effektive Fläche der Antenne zunächst 1950 m^2 . Die Meßmethode wurde wesentlich verbessert [53]. Sorgfältig unterteilte Abschirmung der Drahtwindungen gegenüber den Einflüssen des elektrostatischen Feldes, Verstärkung bis 80 dB (10^4 -fach), Integration der Impulse durch

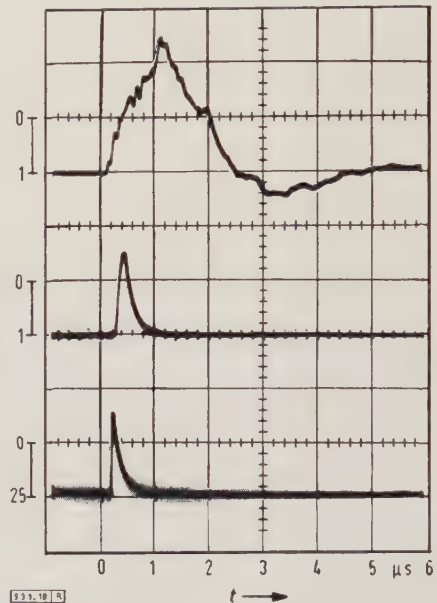


Bild 18. Wiedergabe von Impulsen mit gedämpfter und geschirmter Rahmenantenne.

- oben Wiedergabe des Impulses durch 44-m^2 -Antenne mit Abschirmung ohne Dämpfungswiderstand. Die Ordinaten geben Relativwerte der Intensität wieder.
- Mitte Wiedergabe des Impulses durch $1,9\text{-m}^2$ -Antenne mit gedämpfter Abschirmung
- unten Sendeimpuls

einen RC-Kreis, kleinere Abmessungen der Rahmenantennen (z. B. 44 m^2 effektive Fläche bei einer Abmessung von $2 \text{ m} \cdot 2 \text{ m}$) ermöglichten die Analyse der vom Blitz ausgehenden magnetischen und elektromagnetischen Felder, besonders im Gebiet naher Blitzentladungen [54].

Die Methode, das Magnetfeld mittels Rahmenantennen zu messen, bietet Vorteile gegenüber der Messung des elektrischen Feldes mittels offener Antenne.

Bei der Messung naher Gewitter stört oftmals das elektrostatische Feld, das als erstes Glied in Gl. (8) erscheint. Dieses wird bei Messung mit Rahmenantenne eliminiert. Die magnetische Induktion nach Gl. (9) setzt sich aus dem eigentlichen Induktionsanteil und dem Strahlungsanteil zusammen. Es ist demnach möglich, die Feinstruktur des Blitzes zu messen, wenn der Blitz nur wenige Kilometer entfernt ist. Bei Messung mit offener Antenne muß die Empfindlichkeit der Meßanordnung auf elektrische Feld-

änderungen von einigen Kilovolt je Meter, z.B. 6 kV/m, eingestellt werden, wenn man nicht in Kauf nehmen will, daß der Meßbereich des Kathodenstrahles weit überschritten wird. Das Induktionsglied, nämlich das erste Glied in Gl. (9), hingegen überschreitet selten Beträge von $2 \cdot 10^{-6}$ Tesla = 20 mG; das bedeutet, auf das elektrische Feld übertragen, 10 % des erwähnten Wertes von 6 kV/m.

Eine getreue Wiedergabe des induzierten Magnetfeldes durch eine Breitband-Rahmenantenne stößt auf verschiedene Schwierigkeiten, teils durch unerwünschte Beeinflussung der Drahtwindungen der Antenne und teils durch die obere und untere Frequenzgrenze der Meßanordnung. Die „effektive Höhe“ einer Rahmenantenne mit einer Windungsfläche von 44 m² beträgt 18,4 mm für eine 20-kHz-Schwingung. Die Antenne ist 2,5 m hoch und so dem elektrischen Feld ausgesetzt. Die kapazitive und induktive Kopplung zwischen der unterteilten, geerdeten Abschirmung und der Drahtwindung ist nicht vernachlässigbar. Deswegen muß auf Symmetrie der Anschlüsse geachtet werden, die einem Differentialverstärker zugeführt werden. Daß man trotz dieser Maßnahme kurzzeitige Impulse nicht formgetreu aufnehmen kann, liegt an Eigenschwingungen der Abschirmung (Bild 18). Der in einiger Entfernung von der Antenne ausgestrahlte Impuls wird von einer geschirmten Einwindungs-Antenne mit 1,9 m² nur dann bis auf Zeiten von etwa 0,12 µs richtig wiedergegeben, wenn (nach Untersuchungen von Kleine) sowohl die Rahmenwindung als auch der elektrostatische Schirm gedämpft werden [55]. So ist die obere Frequenzgrenze durch die Antennenkonstruktion und natürlich auch durch die Verstärkereigenschaften festgelegt. Da die in der Antenne induzierten Spannungen proportional der zeitlichen Änderung der Induktion $d\mathcal{B}/dt$ sind, werden sie einem Integrator zugeführt, der die untere Frequenzgrenze bestimmt. Bei den vom Verfasser durchgeführten Messungen wurde ein Integrator nach Wiegand-Hansen [56] mit einer Halbwertszeit von 1 ms benutzt. Das Magnetfeld \mathcal{B} und die Dauer der Blitzströme kann also nicht formgetreu wiedergegeben werden.

Bei gleichzeitiger Messung der elektrischen Feldstärke \mathcal{E} mit offener Antenne und der magnetischen Induktion \mathcal{B} mit Rahmenantenne wurde gelegentlich festgestellt, daß der beiderseitige Beginn der Feldänderungen bei nahen Blitzschlägen von 0,2 bis 2,0 km Abstand nicht zeitlich zusammenfällt (Bild 19). Der Zeitunterschied betrug 21 bis 36 µs bei fünf nahen Blitzen, die im Jahre 1960 am Monte San Salvatore gemessen wurden. Nach Bild 19 springt die elektrische Feldstärke auf etwa 160 V/m, etwa 10 µs später auf etwa 275 V/m, und weitere 11 µs später folgt eine etwas langsamere Feldänderung, die nach 120 µs einen Wert von 630 V/m erreicht. Die magnetische Induktion zeigt erst 21 µs nach dem ersten Feldsprung einen Ausschlag auf 6,85 mG = $0,685 \cdot 10^{-6}$ Vs/m² mit einer Anstiegszeit von 4,5 µs.

Zwei Erklärungen für diese Vorgänge seien diskutiert. Die Vorentladung des Blitzes ist verästelt. Diese getrennten Vorentladungen könnten an verschiedenen räumlich getrennten Stellen mit sehr kurzen Zeitintervallen niederschlagen. Mit der Rahmenantenne können diejenigen Magnetfelder nicht gemessen werden, deren Quelle in Richtung der Spulenachse liegt. Die offene Antenne hingegen ist richtungsunabhängig und reagiert auf alle magnetischen Feldänderungen, unabhängig von welcher Richtung sie kommen. Hierin sieht man einen Beweis für die verschiedentlich geltend gemachte Anschauung über das „gleichzeitige“ Einschlagen des Blitzes an getrennten Stellen. Eine optische Bestätigung steht noch aus. Die visuelle Beobachtung war bei den erwähnten fünf nahen Blitzen durch Regen behindert, jedoch konnte bei einem dieser Vorgänge ein horizontaler Blitz mit einem vertikal zur Erde zielenden Kanal beobachtet werden.

Nach einer anderen Erklärung könnte der erste und der zweite Feldsprung durch so kurzzeitige Entladungen verursacht sein, daß sie von der Rahmenantenne nicht richtig wiedergegeben wurden, und erst der dritte Stromstoß nach 21 µs führte zu einem Ausgleich der Ladungen durch einen

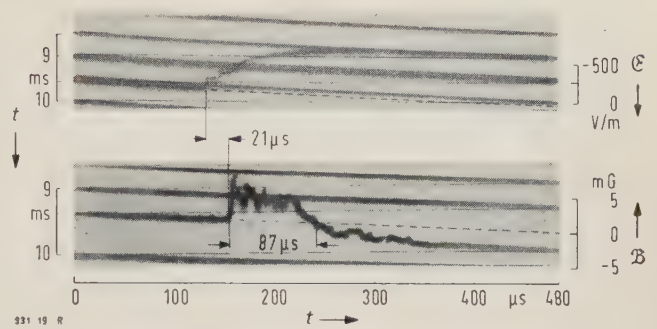


Bild 19. Zeitlicher Verlauf der elektrischen Feldstärke, gemessen mit offener Antenne, und der magnetischen Induktion, gemessen mit Rahmenantenne, bei 2 km entferntem Blitzschlag; am 7. Juli 1960 um 20^h 55^m 50^s.

Blitzkanal. Daß Entladungen von nur einer oder wenigen Mikrosekunden Dauer vorkommen können, soll an Hand der folgenden Bilder gezeigt werden.

Die vom Verfasser ausgeführten Messungen in 2,8 km Abstand vom Monte San Salvatore bei Lugano (Schweiz) sollten u. a. einen Beitrag zu der Frage liefern, inwieweit der zeitliche Verlauf des Magnetfeldes eines Blitzes mit dem Blitzstromverlauf übereinstimmt. Unter gewissen Voraussetzungen könnte dann der Blitzstrom aus Rahmenantennen-Messungen bestimmt werden [52 bis 54]. Nach Gl. (9) und (10) ist die magnetische Induktion von dem Produkt aus dem Blitzstrom I und der Blitzhöhe h und von der zeitlichen Änderung dieses Produktes abhängig. Da Blitzstrom und Blitzhöhe zeitlich veränderlich sind, kann man nicht erwarten, daß das Maximum des Blitzstromes mit dem Maximum des Strommomentes $I \cdot h$ zusammenfällt. Aber bei geeigneter Wahl der Höhe h ließe sich der Strom in grober Annäherung bestimmen.

Bild 20 zeigt den gleichzeitigen Einschlag des Blitzes in die beiden Türme des Monte San Salvatore; diese Aufnahme gelang etwa 7 min vor dem in Bild 13 gezeigten Einschlag, und zwar am 8. Juli 1960 um 21^h 9^m 22^s. Der Gipfel des Monte San Salvatore war um 21^h 3^m einem starken elektrischen Feld mit positiver Feldstärke ausgesetzt. Die Spitzen der beiden Türme zeigten ein kräftiges Sankt Elmsfeuer mit einem Höchstwert des Stromes von 3,8 mA und hatten innerhalb 6 min eine positive Ladung von 1,42 C an die Luft abgegeben. Um 21^h 8^m wurde der erste Einschlag in Turm 2 festgestellt, dann folgten die in Bild 20 gezeigten Blitze in beide Türme, 1 min später kam ein Einschlag in Turm 2 und um 21^h 16^m 28^s der in anderem Zusammenhang



Bild 20. Blitzschlag in die beiden Türme des Monte San Salvatore bei Lugano am 8. Juli 1960 um 21^h 9^m 22^s; Abstand der Türme 400 m, in Bildrichtung 260 m; sichtbare Blitzlänge 850 m

links Turm 2, maximaler Strom 158 A, Dauer 195 ms.
rechts Turm 1, maximaler Strom 110 A während 105 ms, danach 7 Stromimpulse mit 1,3 bis 9 kA.

erwähnte Einschlag in Turm 1 (Bild 13). Alle vier Einschläge waren vom Turm aus gestartet; dies zeigen die nach oben hin gegabelten Entladungen, die vom Turm ihren Anfang nehmen.

Die beiden Blitze (Bild 20) waren vermutlich gleichzeitig entstanden. Während 195 ms floß ein negativer Strom von maximal 158 A nach dem hinteren Turm 2 und transportierte eine negative Ladung von 11,3 C nach Erde. Damit war der Vorgang in Turm 2 beendet. Zum vorderen Turm 1 hingegen begann gleichzeitig ein Strom von maximal 110 A während 105 ms zu fließen und transportierte eine negative Ladung von 6,8 C nach Erde. 30 ms später traten dann sieben Einschläge in Turm 1 mit Stromspitzen von -1,3 kA bis -9,0 kA ein.

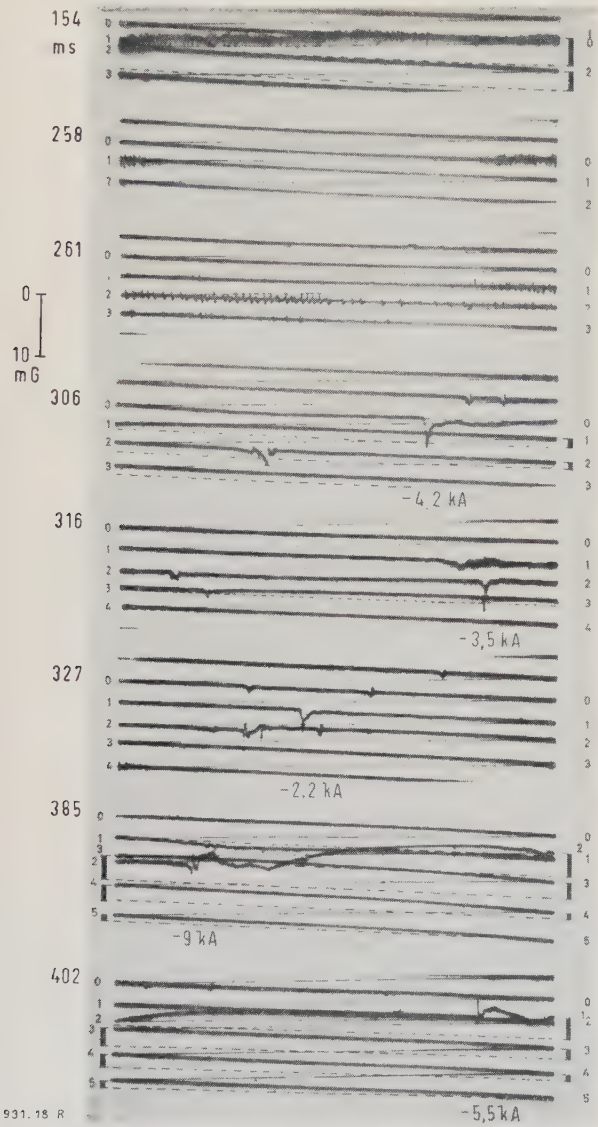


Bild 21. Ausschnitte aus dem Kathodenstrahl-Oszillogramm der magnetischen Induktion B des in Bild 20 gezeigten Einschlages.

Aus dem zeitlichen Verlauf der magnetischen Induktion, von dem Bild 21 einige ausgewählte Abschnitte wiedergibt, ferner aus Messungen der elektrischen Feldstärke, beides in 2,65 km Abstand von Turm 1, aus den Messungen des Koronastromes auf dem Monte San Salvatore und aus den Oszillogrammen des Blitzstromes ergibt sich folgender Verlauf der Entladungen, der in größerem Maßstab schematisch in Bild 22 wiedergegeben ist:

20 ms nach der Auslösung begann sich die elektrische Feldstärke am Meßplatz in 2,65 km Abstand vom Turm 1 zu verstärken. Die statische Feldstärke hatte etwa + 3 kV/m, entsprechend vorherrschend negativer Wolken-

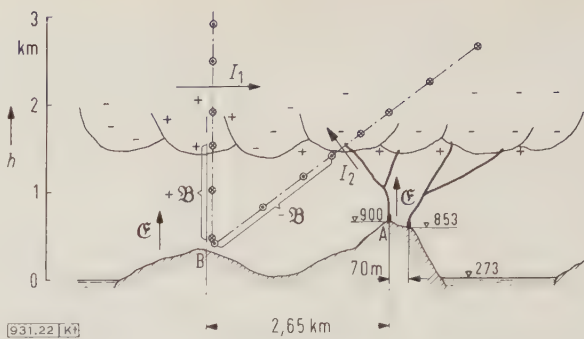


Bild 22. Schematische Darstellung der Ladungsverteilung, des Wolkenblitzes und des Erdblitzes bei Einschlag in die beiden Türme entsprechend Bild 20.

A Einschlagsort im Turm, B Meßort.
Die durch den Strom I_1 des Wolkenblitzes und den Strom I_2 des Erdblitzes hervorgerufenen magnetischen Induktionslinien durchsetzen die Bildebene senkrecht.

ladung, betragen und wuchs nun mit einer nahezu gleichförmig beschleunigten Geschwindigkeit ($+ 55 \frac{\text{kV}}{\text{m}}/\text{s}$ nach 30 ms). Der langsame Verlauf ist typisch für eine Wolkenentladung, die aber zunächst ohne Impulse wie eine Glühentladung verlief. Erst 154 ms nach der Auslösung entwickelte sich ein Wolkenblitz mit kurzzeitigen Impulsen und einer Pausenlänge von 2,9 bis 5,9 μs sowie mit langsamer Zunahme des Magnetfeldes, entsprechend einem horizontalen Blitz mit einer Komponente in der in Bild 22 angegebenen Richtung. Dieser Blitz dauerte mindestens 1500 μs . Etwa 15 ms später wurden in Turm 1 und 2 die langdauernden Ströme registriert, die negative Wolkenladung nach unten während 105 ms (Turm 1) bzw. 195 ms (Turm 2) transportierten. Der Start dieser Entladung geschah ohne die für den Schonland-Prozess typischen Impulse, zum mindesten waren sie so schwach, daß sie nicht registriert wurden. Erst 87 ms nach dem Start (Zeit 258 ms gemäß Bild 21) wurden kurze Impulse mit 2 bis 6 μs Zeitabstand registriert. Inzwischen war das kräftige elektrische Feld so geschwächt, daß der Kathodenstrahl, der über den Meßbereich hinaus aus dem Leuchtschirm verschwunden war, mit einer Geschwindigkeit von $94 \frac{\text{kV}}{\text{m}}/\text{s}$ zurückkehrte und kurze Zeit später wieder aus dem Blickfeld entschwand. Diese Vorgänge ereigneten sich ohne schnelle Feldänderungen und sind typisch für Wolkenentladungen.

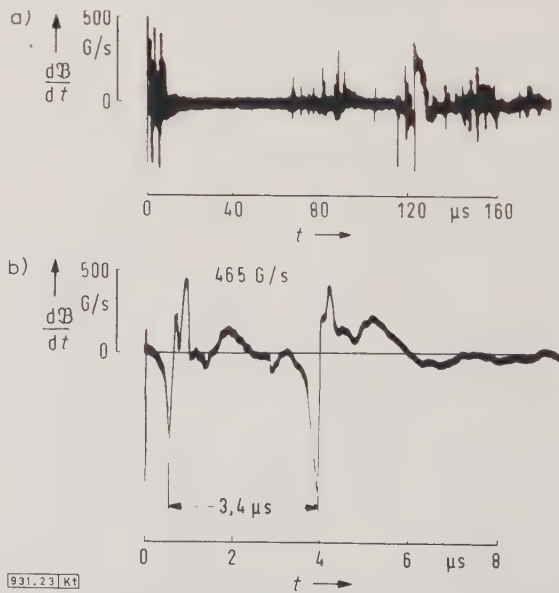


Bild 23. Zeitliche Änderung der magnetischen Induktion $\frac{dB}{dt}$ bei kurzzeitiger Entladung.

oben gesamter Vorgang über 160 μs dargestellt
unten vergrößerter Zeitmaßstab für die ersten 8 μs des Vorganges

Die zur Zeit „261 ms“ aufgenommenen Impulse mit Pausen von 6 bis 24 μ s und länger zeigen einen Vorgang in der Wolke an, da der Stromfluß zu den Türmen noch nicht unterbrochen war, was erst zur Zeit „306 ms“ bei Turm 1 der Fall war. Die kurzzeitigen Induktionen, herührend von Stromimpulsen von einigen Kiloampere, haben sehr kurze Halbwertzeiten, nämlich 6 μ s bei „316 ms“, 7,5 μ s bei „327 ms“, 7,5 μ s bei „345 ms“ und 4,5 μ s bei „421 ms“, und bemerkenswert kurze Stirnzeiten (6 μ s, 4,55 μ s und kürzer), so daß sie von räumlich stark begrenzten Raumladungsgebilden herkommen. Diese Entladungsform kann auch bei Beginn der Blitzentladung, einige Mikrosekunden nach einer Auslösung, festgestellt werden (Bild 23).

Die Länge dieser zur Entladung kommenden Leitpfade dürfte kaum größer als 200 m sein. Zur Zeit „366 ms“ war der Stromfluß zu Turm 2, durch den eine negative Ladung von 11,3 C herab transportiert war, beendet. Diese bedeutenden Ladungsmengen stammen von verschiedenen Wolkengebieten aus weitverzweigten Kanälen. Rechnet man mit einer Vorwachs-geschwindigkeit der Entladungs-kanäle von nur 10 cm/ μ s, so ergibt sich eine Gesamtlänge der nacheinander zu Entladung kommenden Kanäle von 19,5 km. Inzwischen setzten aber neue Entladungen in der

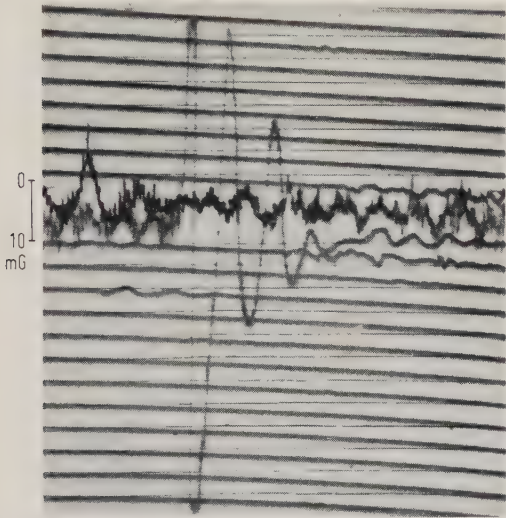


Bild 24. Zeitlicher Verlauf der magnetischen Induktion B bei Einschlag des Blitzes am 1. August 1960 um 7h 36m 2s, vor und nach dem zweiten Teilblitz, 107 ms nach dem ersten Teilblitz.

Wolke mit Komponenten in Richtung des in Bild 22 gezeigten horizontalen Pfeiles ein, die als positive Änderungen der magnetischen Induktion aufgenommen wurden (Zeit „356 ms“, und in Bild 21 Zeiten „385 ms“ und „420 ms“). Zur Zeit „420 ms“ ist der gesamte verwickelte Entladungsprozeß beendet. Hier findet noch einmal ein negativer Stromfluß mit einem Wert von 1,3 kA Höhe zum Turm hin statt, der, nach der Induktion zu urteilen, eine Dauer von etwa 460 μ s hatte.

Wie äußerst kompliziert das Zusammenspiel von horizontalen und vertikalen Blitzen sein kann, zeigt das Magnetfeld des Teilblitzes eines aus drei kräftigen Blitzen bestehenden Einschlages in Turm 2 am 1. August 1960, als dort Ströme von -27 kA, -29 kA und -10 kA registriert wurden. In Bild 24 ist die Aufnahme der magnetischen Induktion des zweiten Teilblitzes wiedergegeben, der 107 ms nach dem ersten auftrat; 825 μ s vorher verstärkten sich die Impulse mit einer Zeitfolge von einigen Mikrosekunden. Diese Impulse sind einem Hin- und Herpendeln des Magnetfeldes mit einer Frequenz von 22 bis 27 kHz überlagert. Der Strom im Turm 2 mit einer Amplitude von -29 kA ist völlig aperiodisch (Bild 25), die magnetische Induktion dieses aus vertikalen und horizontalen Teilen bestehenden Blitzes dagegen gedämpft periodisch, beim ersten Teilblitz entsprechend einer Frequenz von 25,5 kHz,

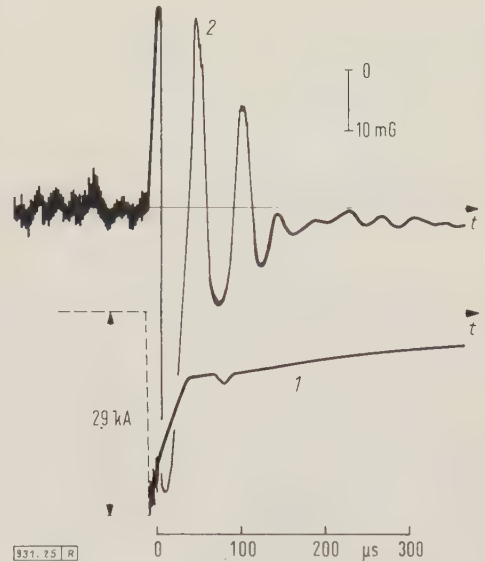


Bild 25. Verlauf des Stromes (I) im Turm 2 des Monte San Salvatore und der magnetischen Induktion (2) in 2,8 km Entfernung.

beim zweiten entsprechend 22,3 kHz und beim dritten (weitere 107 ms später) entsprechend 28,5 kHz.

Die Messungen haben bisher keine eindeutige Beziehung der magnetischen Induktion zu der Blitzstromstärke ergeben. Es ist während einer Gewitterperiode nur zweimal gelungen, gleichzeitig den Blitzeinschlag im Turm und das Magnetfeld in 2,65 km Abstand aufzunehmen. Dies lag teils an meteorologischen Bedingungen — im Mai und Juni 1960 schlug der Blitz keinmal in die Türme ein entgegen allen langjährigen Erfahrungen — und teils an der außergewöhnlichen Intensität der Gewitter in diesem Gebiet. Damit man die Vorgänge lange vor dem Entstehen der Blitzbahn aufnehmen kann, muß die Auslöseanordnung empfindlich eingestellt sein. Nach dem Auslösen nehmen dann die Oszilloskope 1 s lang den Vorgang in 2000 Zeilen auf und sind danach zum automatischen Aufspulen des Filmes mindestens 8 s lang gesperrt. Nicht selten bildet sich dann ein Blitz in dieser Totzeit.

Periodische gedämpfte Magnetfeldänderungen mit Frequenzen von etwa 15 kHz bis 40 kHz stellt man öfters bei Wolkenentladungen fest. An anderer Stelle wurde der aperiodische Verlauf des Magnetfeldes bei Einschlag in die Erde gezeigt [57]. Die Aufnahmen in Bild 21 und 24 können also noch nicht abschließend beurteilt werden. Jedoch sind die kurzzeitigen Impulse typisch für die Feinstruktur der Entladungen, vor allem beim Start unmittelbar nach der Aus-

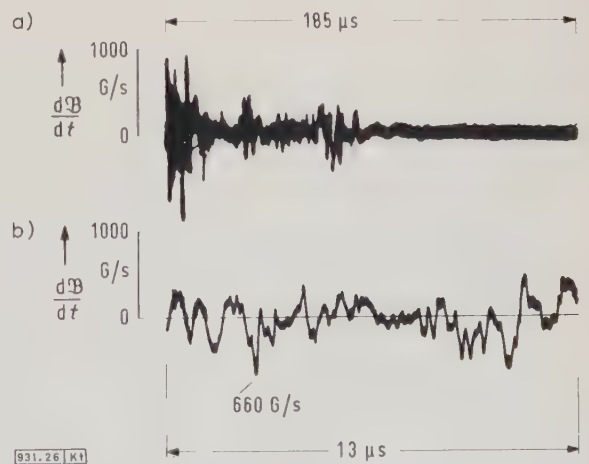


Bild 26. Schnelle Änderung der magnetischen Induktion dB/dt in 8 km Entfernung von der Einschlagstelle. Ausschnitt aus Bild 24.

- a) gesamter Vorgang über 185 μ s dargestellt,
- b) vergrößerter Zeitmaßstab für die ersten 13 μ s des Vorganges.

lösung. Bild 26 zeigt eines vieler Beispiele hierfür. Diese Aufnahmen an gedämpften Rahmenantennen mit einer Grenzfrequenz von etwa 5 MHz und von 18 MHz zeigen Impulsfolgen an, die sehr viel kürzer als die aus dem optisch sichtbaren Ruckstufenprozeß zu erwartenden sind. Häufig festgestellte Mittelwerte der Pausen zwischen den Impulsen sind 3 µs mit Grenzen von 1,5 bis 6 µs. Die kürzesten Folgen, die gemessen wurden, gehen auf Zeiten bis 0,2 µs herunter (Bild 27).

Dieser so ausführlich geschilderte Prozeß des in Bild 20 gezeigten Blitzes deckt sich nicht ganz mit einer Deutung der Vorgänge beim Blitzschlag in das Empire Building in New York. *Schonland* und *Malan* haben die Voraussetzung gemacht [58], daß sich in der Wolke oberhalb des Gebäudes, von dem aus die Entladung beginnt, positive Raumladungen befinden. Zu dieser emittiert die Korona-Entladung von der Turmspitze aus negative Ladungen. Dadurch wird die Entladung dieser positiven Wolkenladungen eingeleitet, denen dann ein negativer Strom folgt. In dem vom Verfasser untersuchten Fall ist diese Deutung nicht möglich.

Eine gewisse Unsicherheit herrscht hinsichtlich der Messung der Frontzeit des Blitzstromes. Es war bereits erläutert worden, daß man durch die Messung mit Rahmenantenne nicht ohne weiteres hierauf schließen kann, da sowohl Blitzstrom als auch Blitzlänge veränderlich sind. *Wait* [59] rechnet mit einer Frontzeit des Strommomentes von 8 µs, was

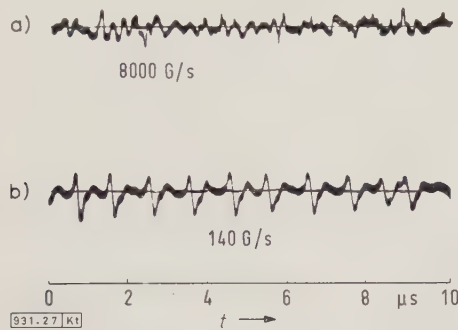


Bild 27. Schnellste Änderungen der magnetischen Induktion $d\Phi/dt$, aufgenommen mit Rahmenantenne.

- a) Grenzfrequenz 15 MHz, Entfernung rd. 2 km vom Blitz, zeitliche Folge der Impulse 0,2 bis 0,65 µs,
 b) Grenzfrequenz 5 MHz, Entfernung rd. 7 km vom Blitz, zeitliche Folge der Impulse 0,65 bis 0,94 µs.

einer Frontzeit des Stromes von 2 µs oder weniger gleichkommt. *Watt* dagegen [60] rechnet mit 7,5 µs Frontzeit eines 30-kA-Stromes von 60 µs Halbwertdauer und erhält 40 µs für die Frontzeit des Strommomentes. Beide Werte scheinen einleuchtend; die vom Verfasser ausgeführten Messungen haben oft Frontzeiten des Strommomentes unter 8 µs ergeben.

Blitzzähler

Einen so überaus verwinkelten Prozeß wie die Blitzentladung auf elektromagnetischer Grundlage zählen zu wollen, scheint ein hoffnungsloses Bemühen. Wenn man an einen Blitzzähler außerdem die Forderung stellt, daß er unabhängig von einer äußeren Stromquelle arbeiten und in großer Stückzahl eingesetzt werden soll, wird die Aufgabe noch schwieriger. Man muß also gewisse Einschränkungen machen.

Pierce [61] entwickelte einen Zähler mit einer Triode mit kalter Kathode als Schaltorgan. Das Gitter der Triode, die bei einer Spannung von etwa +70 V stromleitend wird, ist auf eine Spannung vorgespannt, die einige Volt unter der Zündspannung liegt. Das Gitter ist dann über einen Filterkreis einer Antenne zugeführt. Das Filter gibt dem Zähler seine größte Empfindlichkeit bei einer Frequenz von etwa 500 Hz. Damit sind also grundlegend zwei Bestimmungsstücke festgelegt. Der Zähler registriert nur dann, wenn ihm von der Antenne positive Impulse zugeführt werden. Der Filterkreis hält die raschen Impulse entsprechend Frequen-

zen von 20 kHz und mehr fern. Der Zähler soll nicht die vom Blitz abgestrahlten Spherics zählen, deren Amplitude proportional mit dem Abstand vom Entstehungsort abnimmt, und zwar entsprechend folgender Änderung der elektrischen Feldstärke

$$\Delta \mathcal{E}_S = \alpha \frac{10}{r} \quad (16)$$

Aus der Zahlenwertgleichung (16) ergibt sich $\Delta \mathcal{E}_S$ in V/m, wenn der Abstand r in km eingesetzt wird; die Werte von α liegen in der Regel zwischen 8 und 200, häufig zwischen 20 und 50. Soll ein Blitzzähler nicht auf die vom Blitzkanal abgestrahlten Wellen ansprechen, muß seine Zündspannung für diese Frequenzen höher liegen, als Gl. (16) angibt.

Pierce hat an eine Reichweite von 40 km gedacht und ein einfaches RC-Filter mit bevorzugten Frequenzen zwischen 50 und 200 Hz vorgesehen. Die praktische Ausführung von *Golde*, die an anderer Stelle beschrieben ist [62], hat ein Filter mit 3-dB-Grenzfrequenzen von 160 Hz und 2,4 kHz. Das ist ein Frequenzbereich, welcher der elektrostatischen Feldänderung nach Gl. (8) Rechnung trägt; die untere Grenze dient dazu, den Zähler unempfindlich gegenüber den sehr langsamen Feldänderungen bei Wolkenblitzen zu machen, durch die ebenfalls positive Ladungen auf der Antenne frei werden können, die obere Grenze hingegen dazu, um ihn gegenüber den raschen Feldänderungen mit großer Reichweite abzugrenzen. Die Reichweite des Zählers sollte einigermaßen scharf begrenzt sein, da das elektrostatische Glied für Reichweiten über 10 km abnimmt entsprechend

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{stat}} = \beta \left(\frac{10}{r} \right)^3 \quad (17)$$

$\Delta \mathcal{E}_{\text{stat}}$ ergibt sich in V/m, wenn der Abstand r in km eingesetzt wird, die Werte β liegen zwischen 50 und 500. Die praktische Ausführung ergibt bei 5 m hoher Antenne ($C = 260$ pF) eine kleinste Ansprechfeldstärke von 2,5 V/m (Schwellenwert).

Brook und *Kitagawa* [63] betonen, daß ein Blitzzähler auf dieser Grundlage kein genaues quantitatives Instrument sein kann. Zunächst kann die Reichweite niemals scharf umrissen sein. Ferner ist es oftmals unmöglich, zwischen Erdblitz und Wolkenblitzen zu unterscheiden. Wolkenblitze haben nach den Untersuchungen von *Kitagawa* [30] typische positive und negative Feldänderungen mit einer Grundfrequenz von etwa 250 Hz, die wohl instande sind, einen Blitzzähler zum Ansprechen zu bringen.

Diese Bedenken decken sich mit den Erfahrungen des Verfassers und haben ihn und andere Mitarbeiter veranlaßt, in Skandinavien eine Abweichung gegenüber dem Blitzzähler von *Pierce-Golde* vorzunehmen, um auf breiterer Basis mit dieser Ausführung Erfahrung zu gewinnen [62, 64]. Über die neueren Ergebnisse wird an anderer Stelle berichtet werden. Die Reichweite der Blitzzähler kann nur durch Beobachtungen an verschiedenen Beobachtungspunkten als statistischer Mittelwert gewonnen werden. Ist die Reichweite so klein, daß der Abstand der Blitze vom Beobachtungsort akustisch festgestellt werden kann, so ist es nicht allzu schwierig, einigermaßen zuverlässige Angaben zu erhalten. Herabgesetzte Reichweite durch Verringern der Empfindlichkeit hat den Erfolg, daß weniger Wolkenblitze gezählt werden. Mit diesen am *Pierce-Golde*-Zähler vorgenommenen Änderungen sind nach den Feststellungen des Verfassers etwa $(35 \pm 15)\%$ der Gesamtzahl Wolkenblitze. Dies sind Erfahrungen mit Blitzen aus Wolken, wie sie häufig im Flachland oder Hügelland vorkommen. Im sehr gebirgigen Gelände, z. B. in den Alpen, kommen recht häufig horizontale Blitze vor. Hierbei dürfte der Blitzzähler mit der von *Pierce-Golde* vorgeschlagenen Charakteristik keine zuverlässigen Werte für die Anzahl der Erdblitzte ergeben.

Als ein Beispiel der Meßergebnisse, die in den Jahren 1959 und 1960 in Schweden gewonnen wurden, zeigt die Karte in Bild 28 Werte von etwa 100 Stationen. In Schwe-

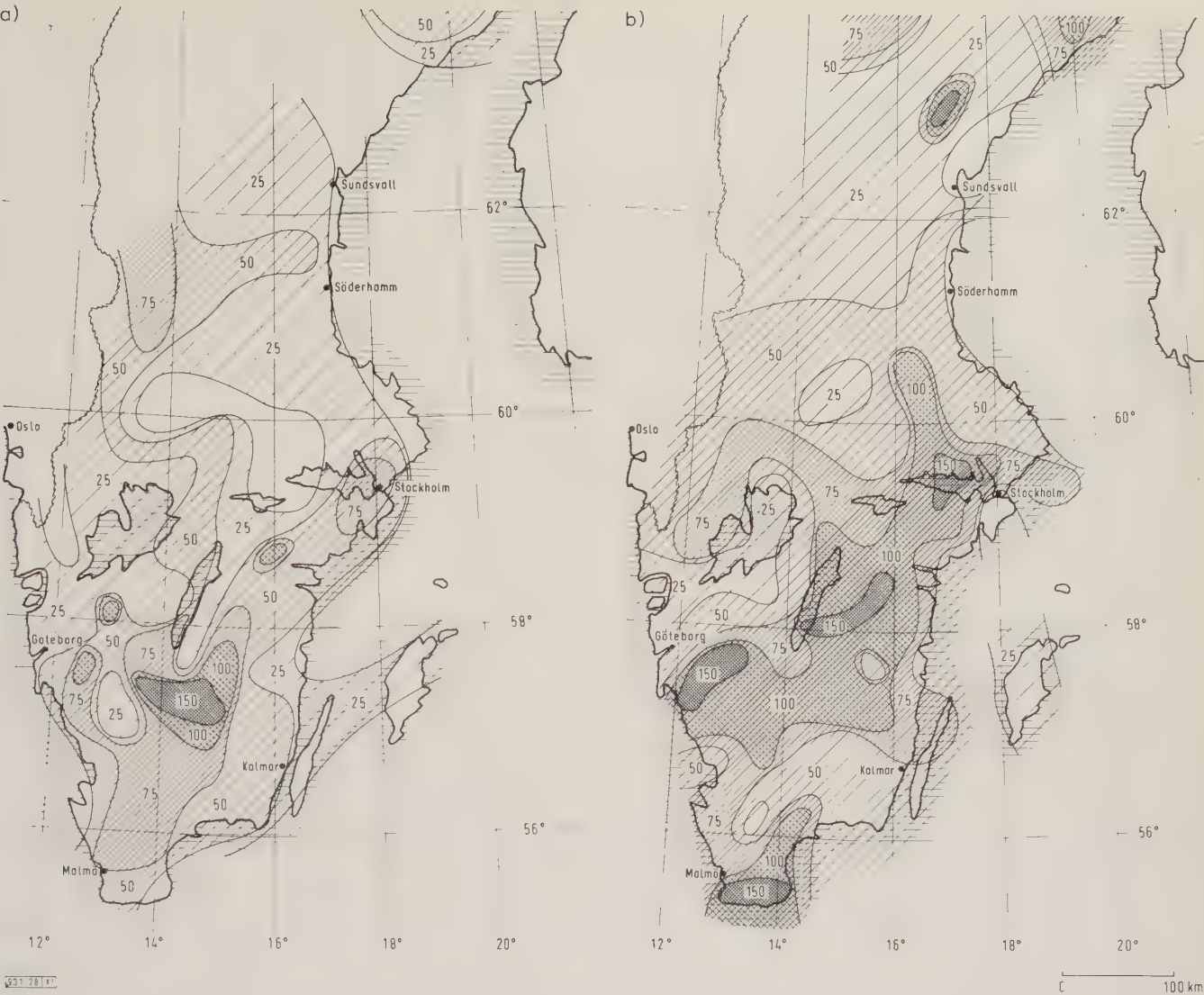


Bild 28. Anzahl der Blitze gegen Erde, bezogen auf eine Fläche von 100 km² im südlichen Schweden.
a) im Jahre 1959 (Gesamtzahl der Blitze etwa 100 000),
b) im Jahre 1960 (Gesamtzahl der Blitze etwa 160 000).

den gab es 145 Registrierstationen im Jahre 1960. Die Karten geben die starken Verschiebungen der Blitzintensität wieder, die von Jahr zu Jahr festgestellt werden. Es sind Beobachtungen über mindestens 5 Jahre erforderlich, damit man mittlere Werte erhält. Bei der Berechnung der Anzahl Blitze je 100 km² wurde die Gesamtzahl einwandfreier Registrierungen auf 65 % verringert und eine durch viele Beobachtungen ermittelte mittlere Reichweite von 15 km entsprechend einer Fläche von 700 km² zugrunde gelegt.

Die Anzahl der Tage, an denen der vom Verfasser verwendete Blitzzähler registriert, ist nicht identisch mit der Anzahl der meteorologisch festgestellten Anzahl Gewittertage, auch dann nicht, wenn nur diejenigen Tage gerechnet werden, an denen der Blitzzähler mehr als viermal zählt. Die mittlere statistische Reichweite für die akustische Wahrnehmbarkeit von Gewittern dürfte etwa 10 bis 12 km betragen. Um die Reichweite derjenigen der praktischen Beobachtung anzupassen und um den Fehler durch Wolkenblitze einzuengen, sind seit zwei Jahren an einigen Stationen Vergleichsmessungen mit Blitzzählern im Gange, bei denen die Empfindlichkeit geändert wurde (Schwellenwert der elektrischen Feldstärke 11 V/m) und deren Filterkreis noch schärfer Frequenzen unter 100 Hz und über 3 kHz abschneidet. Auf Grund der gewonnenen Erfahrungen hat B. Keržar einen Blitzzähler auf Transistorbasis mit einem 6-V-Akkumulator als Stromquelle entwickelt, der zur Zeit erprobt wird (Bild 29). Die charakteristischen Daten der

Blitzzähler, die auf der Grundvorstellung von *Pierce* aufbauen, sind in Tafel 6 zusammengestellt.

Ein anderer Typ von Blitzzählern wurde von dem International Radio Consultative Committee (CCIR) im Jahre 1959 zur Erprobung empfohlen [65] und von *Horner* [66]

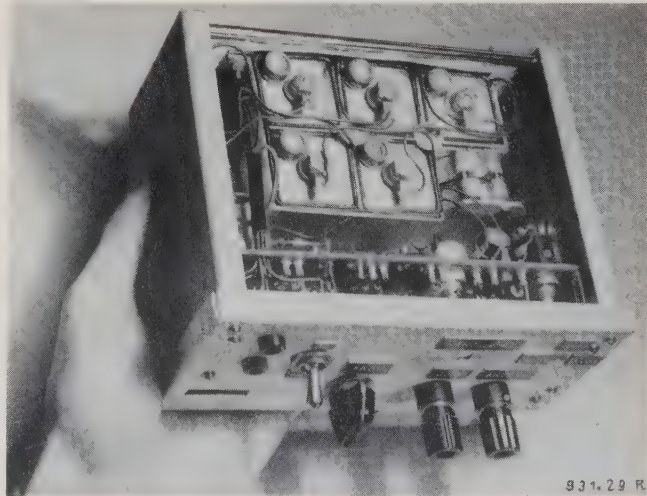


Bild 29. Blitzzähler auf Transistorbasis von B. Keržar.

Tafel 6. Blitzzählerdaten.

Nr.	Zähler nach	Schwellenwert der elektrischen Feldstärke V/m	Grenzfrequenz d. Filters b.						relative ¹⁾	
			3 dB	10 dB	20 dB	3 dB	10 dB	20 dB	Reichweite	Feldstärke
			untere Grenze			untere Grenze			Ø	Ø
1	Pierce-Golde benutzt in Skandinavien	2,5	170	47	12	2,4	7	25	1,26	1,58
2		5							1	1
3	Versuch in Schweden	11	200	80	37	2	4,7	9	0,78	0,59
4	Transistor-Ausführung	11	210	120	82	5	8	11	0,78	0,59

1) bezogen auf die in Zeile 2 angegebenen gleich Eins gesetzten Werte.

genauer untersucht. Er dient in erster Linie zur Untersuchung der Intensität von Gewittern, welche die Quelle von Rundfunkstörungen sind. Dementsprechend ist das Filter bemessen, dessen 3-dB-Grenzfrequenzen etwa 3 kHz und 60 kHz sind. Da nun die Amplitude der elektrischen Feldstärke der von der Blitzbahn abgestrahlten Wellen nach Gl. (16) im Verhältnis von etwa 1 : 25 variieren kann, wird auch die Reichweite in weiteren Grenzen schwanken können. Die mittlere Reichweite des Zählers ist etwa 60 km, kann aber auch 300 km betragen [66]. Der Verfasser und seine Mitarbeiter haben vergleichende Untersuchungen an Blitzzählern durchgeführt, Tafel 7 zeigt einige zusammenfassende Ergebnisse.

Tafel 7. Ergebnisse vergleichender Untersuchungen mit Blitzzählern.

1	2	3	4	5	6	7	8
Datum	Ort	Land	Anzahl der Registrierungen bei Gewittern mit Blitzzählern nach			n ¹⁾	Bemerkungen
			Tafel 6				
			CCIR	Nr. 2	Nr. 3		
7. 6. 60			4016	720	581	0,81	Gewitterfronten
16. 5. 60			1961	593	283	0,48	Gewitterfronten
3. 6. 60			952	16	0	—	Abstand mehr als 12 km
8. 6. 60	Lugano (Agra)	Schweiz	446	29	0	—	Abstand mehr als 12 km
4. 6. 60	45° 58' N		642	1	0	—	Abstand mehr als 25 km
2. 6. 60	8° 55' O		542	0	0	—	Abstand mehr als 25 km
21. 5. 60			66	1	1	—	örtliches Gewitter
25. 5. 60			36	2	1	—	örtliches Gewitter
16. 7. 60	Uppsala (Husby- borg) 59° 52' N 17° 36' O	südliches und mittleres Schweden	882	26	22	0,85	örtlich isolierte Gewitter
27. 7. 60			441	68	67	0,98	örtlich isolierte Gewitter
26. 6. 60	Karls- hamn (Hemsjö) 56° 18' N 14° 52' O		—	106	44	0,415	Abstand 13 km bis 0,3 km
16. 7. 60			—	225	119	0,53	Abstand 30 km bis 0,3 km
6. 6. 60	Lillsjödäl (Blanka- ström) 57° 14' N 16° 2' O		—	725	468	0,65	Gewitterfronten (4 ¹ / ₂ h)
21. 8. 60			—	156	66	0,42	Abstand einige Kilometer

¹⁾ n ist das Verhältnis der Blitzzahlen unter Spalte 6 zu denen unter Spalte 5.

Seit 200 Jahren wird die Häufigkeit von Gewittern durch die Angabe von Gewittertagen bestimmt und in geographischen Karten niedergelegt. Man weiß, daß diese Angaben mit vielen Mängeln behaftet sind, da sie auf der akustischen Wahrnehmbarkeit von Gewittern beruhen. Ein einfacher Blitzzähler wird nie ein Präzisionsgerät sein können. Er kann aber sehr wohl die bisherigen Angaben über Gewitterhäufigkeit vervollständigen und Daten über Blitzintensität geben. Man ist in den letzten Jahren ein gutes Stück vorangekommen, um dieses Ziel zu erreichen.

Zusammenfassung

Die Arbeit gibt eine Übersicht über Entstehung und zeitlichen Verlauf der Blitzbahn. Wachstumsgeschwindigkeit der Vorentladung in Beziehung zur wirksamen Ladungsmenge des Leitkanales, zum Ausgleich kommende Ladungsmenge, Strom und Strom-Anstiegsgeschwindigkeit sind die Kenngrößen, deren Werte besprochen werden. Das statische elektrische Feld wird am Erdboden durch Raumladungen stark geschwächt. An einer Messung des elektrischen Feldes wird die Bedeutung des elektrisch geladenen Regens gezeigt. Die positiven Raumladungen spielen für die Auslösung des Blitzes eine wichtige Rolle. Die quasistatische elektrische Feldstärke einer Vorentladung erreicht nur selten und in einem begrenzten Gebiet Werte über 20 kV/m, wie ein Beispiel zeigt. Durch gleichzeitige Messungen der Entladungsströme und der Blitzströme am Einschlagsort (Monte San Salvatore) sowie der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Induktion in 2,7 km Abstand ist eine genaue Analyse des zeitlichen Ablaufes einer Wolkenentladung und eines darauf folgenden Erdblitzes möglich gewesen. Die Feinstruktur der elektrischen Vorgänge zeigt Impulse in einer Zeitfolge bis herab zu 0,2 µs. Das Problem der Blitzzählung und deren Ergebnisse werden behandelt.

Schrifttum

[1] Wichmann, H.: Grundprobleme der Gewitter. Wolfenbüttler Verlagsanstalt, Wolfenbüttel-Hannover 1958.

[2] Watt, A. D.: ELF, Electric fields from thunderstorms. J. Res. Standards Bd. 64 D (1960) S. 425–433.

[3] Barlow, J. S., u. Frey, G. W., u. Newman, J. B.: Very long frequency noise power from the lightning discharge. J. Franklin Inst. Bd. 258 (1954) S. 187–203.

[4] Atlas, D.: Radar lightning echoes and atmospheric in vertical cross section. Recent advances in atmospheric electricity. Pergamon Press, London 1958. S. 441–459.

[5] Laby, T. H.: Wave form, energy and reflection by the ionosphere of atmospherics. Proc. roy. Soc. A: Math. & phys. Sci. Bd. A 174 (1940) S. 145–163.

[6] Lewis, E. A., u. Harvey, R. B., u. Rasmussen, I. E.: Hyperbolic direction finding with spheres of transatlantic origin. J. Geophys. Res. Bd. 65 (1960) S. 1879–1905.

[7] Barkhausen, H.: Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen. Phys. Z. Bd. 20 (1919) S. 401–403.

[8] Helliwell, R. A., u. Morgan, M. G.: Atmospheric whistlers. Proc. Instn. Radio Eng. Bd. 47 (1959) S. 200–208.

[9] Kraus, J. D.: Impulsive radio signals from the planet Venus. Nature Bd. 178 (1956) S. 33.

[10] Horner, F.: Radio noise from planets. Nature Bd. 180 (1957) S. 1253.

[11] Schonland, B. F. I.: The lightning discharge. S. 576–623. Handbuch der Physik Bd. 22. Gasentladungen Teil 1. Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg 1956.

[12] Schonland, B. F. I., u. Collens, H.: Progressive lightning. Proc. roy. Soc. A: Math. & phys. Sci. Bd. A 143 (1934) S. 654–674.

[13] Schonland, B. F. I., u. Malan, D. J., u. Collens, H.: Progressive lightning II. Proc. roy. Soc. A: Math. & phys. Sci. Bd. A 152 (1935) S. 595–625.

[14] Malan, D. J., u. Collens, H.: The fine structure of return lightning strokes. Proc. roy. Soc. A: Math. & phys. Sci. Bd. A 162 (1937) S. 175–203.

[15] Malan, D. J.: Lightning. Endeavour Bd. 18 (1959) S. 61–69.

[16] Bruce, C. E. R., u. Golde, R. H.: The lightning discharge. J. Instn. electr. Eng., London, Bd. 88 (1941) S. 487–520.

[17] Workman, E. J., u. Brook, M., u. Kitagawa, N.: Lightning and charge storage. J. Geophys. Res. Bd. 65 (1960) S. 1513–1517.

[18] McEachron, K. B.: Lightning to the Empire State Building. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 60 (1941) S. 885–889.

[19] Henguth, I. H., u. Anderson, I. G.: Lightning to the Empire State Building. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 71 (1952) S. 640–649.

[20] Berger, K.: Resultate der Blitzmessungen der Jahre 1947 bis 1954 auf dem Monte San Salvatore. Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 46 (1955) S. 405–424.

[21] Appleton, E. V., u. Watson Watt, R. A., u. Herd, I. F.: On the nature of atmospherics. Proc. roy. Soc. A: Math. & phys. Sci. Bd. A 111 (1926) S. 616–653.

[22] High voltage testing techniques (1959). Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, Genf 1959. IEC-Publ. 42 (Technical Com.).

[23] AIEE Lightning Reference Book. American Institute of Electrical Engineers, New York 1937.

[24] McCann, G. D.: The measurement of lightning currents in direct strokes. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 63 (1944) S. 1157–1164.

[25] Reynolds, S. E., u. Neill, H. W.: The distribution and discharge of thunderstorm charge-centers. J. Meteor. Bd. 12 (1955) S. 1–12.

[26] Hatakeyama, H.: The distribution of the sudden change of electric field on the earth's surface due to lightning discharge. — Recent advances in atmospheric electricity. Pergamon Press, London 1958. S. 289–298.

[27] Hyllén-Cavallius, N., u. Strömberg, Å.: Field measurements of lightning currents. Elteknik Bd. 2 (1960) S. 109–113.

[28] Müller-Hillebrand, D.: On the frequency of lightning flashes to high objects. A study on the gulf of Bothnia. Tellus Bd. 12 (1960) S. 444–449.

[29] A method of estimating lightning performance of transmission lines. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 69 (1950) S. 1187–1195.

[30] Kitagawa, N., u. Kobayashi, M.: Field changes and variations of luminosity due to lightning flashes. Recent advances in atmospheric electricity. Pergamon Press 1958, S. 485–501.

- [31] Rüdénberg, R.: Die Kopfgeschwindigkeit elektrischer Funken und Blitze. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern Bd. 9 (1930) S. 1–6.
- [32] Lundholm, R.: Eine neue Theorie für den Stromverlauf in Blitzentladungen (Schwed.). Tekn. Tidskrift Bd. 71 (1941), S. 1–6 u. 23–29. [Siehe auch: Lundholm, R.: Induced overvoltage-surges on transmission lines and their bearing on the lightning performance at medium voltage networks. Trans. Chalmers University of Technology. Gothenburg/Schweden 1957 Nr. 188.]
- [33] Rusk, S.: Induced lightning overvoltages on power-transmission lines with special reference to the over-voltage protection of low-voltage networks. Diss. Stockholm, Göteborg 1957.
- [34] Griscom, S. B.: The prestrike theory and other effects in the lightning stroke. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 77 (1958) S. 919–931.
- [35] Griscom, S. B., u. Skooglund, I. W., u. Hileman, A. R.: The influence of the prestrike on the transmissionline lightning performance. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 77 (1958) S. 933–940.
- [36] Petersen, W.: Der Schutzwert von Blitzseilen. ETZ Bd. 35 (1914) S. 1–6.
- [37] Peek, F. W.: Lightning and other transients on transmission lines. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 43 (1924) S. 111–123.
- [38] Norinder, H.: Electric thunderstorm field researches. Electr. Wld. Bd. 83 (1924) S. 223–226.
- [39] Norinder, H.: Indirekte Blitzüberspannungen auf Kraftleitungen. ETZ Bd. 59 (1938) S. 105–111.
- [40] Chalmers, J. A.: Atmospheric electricity. Pergamon Press, London 1957.
- [41] Kirkman, I. R., u. Chalmers, J. A.: Point discharge from an isolated point. J. Atmosph. Terrest. Phys. Bd. 10 (1957) S. 258–265.
- [42] Weber, L.: Mitteilungen betreffend Gewittererscheinungen und Blitzschutz. ETZ Bd. 7 (1886) S. 446–449.
- [43] Lutz, C. W.: Über die Spitzenentladung bei Gewittern und Schauern. Gerlands Beitr. Geophysik Bd. 57 (1942) S. 317–333.
- [44] Feteris, P. I.: Detailed observations of thunderstorms. Weather Bd. 7 (1952) S. 35–39.
- [45] US Air Force. Air research and development command. Handbook of Geophysics. MacMillan, New York 1960.
- [46] Wagner, C. F., u. McCann, G. D.: Induced voltages on transmission lines. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 61 (1942) S. 916–930.
- [47] Wagner, C. F. (Hileman, A. R.): A new approach to calculation of lightning performance of transmission lines. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. (III) Bd. 27 (1956) S. 1233–1254 und Trans. Amer. Inst. electr. Eng. (III) Bd. 30 (1959) S. 996–1021 und Trans. Amer. Inst. electr. Eng. (III) Bd. 31 (1960) S. 581–603.
- [48] Lundholm, R.: Overvoltage in a direct lightning stroke to a transmission-line tower. CIGRE-Ber. 1958 Nr. 333.
- [49] Aigner, V.: Induzierte Blitzüberspannungen und ihre Beziehung zum rückwärtigen Überschlag. Diss. TH Berlin 1935. (Referat in ETZ Bd. 56 (1935) S. 497–500).
- [50] Matthias, A.: Der gegenwärtige Stand der Blitzschutzfrage. ETZ Bd. 50 (1929) S. 1469–1475.
- [51] Austin, L. W.: Determination of the direction of atmospheric disturbances or static in radio telegraphy. J. Franklin Inst. Bd. 191 (1921) S. 619–629.
- [52] Norinder, H.: Lightning currents and their variations. J. Franklin Inst. Bd. 220 (1935) S. 69–92.
- [53] Norinder, H.: Some aspects and recent results of electromagnetic effects of thunderstorms. J. Franklin Inst. Bd. 244 (1947) S. 109–130 u. 167–207.
- [54] Norinder, H.: Magnetic field variations from lightning strokes in vicinity of thunderstorms. Ark. Geofysik Bd. 2 (1956) S. 423–451.
- [55] Müller-Hillebrand, D.: Measurement of rapid magnetic field changes in lightning discharges. Elteknik Bd. 3 (1960) S. 110–112.
- [56] Wiegand, D. E., u. Hansen, W. W.: A 60 cycle hysteresis looptracer for small samples of low permeability material. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. Bd. 66 (1947) S. 119–133.
- [57] Müller-Hillebrand, D.: Blitzforschung am Monte San Salvatore. ETZ-A Bd. 81 (1960) S. 822–824.
- [58] Schonland, B. F. J., u. Malan, D. J.: Upward stepped leaders from the Empire State Building. J. Franklin Inst. Bd. 258 (1954) S. 271–275.
- [59] Wait, J. R.: On the waveform of radio atmospheric at short ranges. Proc. Instn. Radio Eng. Bd. 44 (1956) S. 1052.
- [60] Watt, A. D.: ELF-Electric fields from thunderstorms. J. Res. Standards Bd. 64 D (1960) S. 425–433.
- [61] Pierce, E. T.: The influence of individual variations in the field-changes due to lightning discharges upon the design and performance of lightning flash counters. Arch. Meteor., Geophysik u. Bioklimatologie Serie A Bd. 9 (1956) S. 78–86.
- [62] Müller-Hillebrand, D.: Lightning counter and results obtained in Sweden during the thunderstorm period 1958. Tellus Bd. 30 (1959) S. 217–233.
- [63] Brook, M., u. Kitagawa, N.: Electric field changes and the design of lightning flash counters. J. Geophysical Res. Bd. 65 (1960) S. 1927 bis 1931.
- [64] Müller-Hillebrand, D., u. Johansen, O., u. Saraoja, E.: Results of lightning counter measurements in Sweden, Norway and Finland. CIGRE-Ber. 1960 Nr. 330.
- [65] An instrument for counting local lightning flashes. Wld. Meteor. Organ. Bull. Bd. 8 (1959) S. 14–18.
- [66] Horner, F.: The design and use of instruments for counting local lightning flashes. Proc. Instn. electr. Eng. B Bd. 107 (1960) S. 321–330.

Gewitterforschung auf dem Monte San Salvatore

Von Karl Berger, Zürich*)

DK 551.594.21.001.891

Einführung

Der Schutz von Lebewesen und Sachen gegen die Wirkungen eines Blitzeinschlages bietet heute noch schwierige Probleme theoretischer und wirtschaftlicher Natur. Um diese lösen zu können, bedarf es einer eingehenden Kenntnis der physikalischen Eigenschaften des Blitzes. Seit *Franklin* vor gut 200 Jahren den ersten Blitzableiter auf seinem Haus installiert, sind Untersuchungen über den Blitzstrom angestellt worden. Solche Messungen sind nicht einfach, weil es sich zeigt, daß der Verlauf des Blitzstromes recht kompliziert und von Fall zu Fall sehr verschiedenartig sein kann. Der Aufsatz befaßt sich mit den Methoden und Ergebnissen moderner Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano. Der Verfasser versucht, aus den bisherigen elektrischen und optischen Beobachtungen einige allgemeine Folgerungen für den Blitzschutz von Lebewesen, Gebäuden und elektrischen Anlagen zu ziehen.

Auswahl eines Beobachtungspunktes

Die Gewitterforschung auf dem Monte San Salvatore entstand aus der Notwendigkeit, den Verlauf des Blitzstromes genau kennenzulernen. Oszillographische Überspannungsmessungen an Hochspannungsleitungen in den Jahren 1928 bis 1937 hatten einwandfrei ergeben, daß Übertragungsleitungen hoher Betriebsspannung nur durch direkte Blitzeinschläge, aber nicht durch indirekte Blitzeinwirkungen gefährdet werden [1 bis 3]. Es ist dabei ein großer Unterschied, ob man sich mit der Messung des Scheitelwertes eines Blitzstromes begnügt, oder ob man den gesamten zeitlichen Verlauf des Blitzstromes kennenlernen will.

Im ersten Fall stehen in den sogenannten „Stahlstäbchen“ („magnetic links“) sehr einfache und für monopolare Ströme verhältnismäßig genaue und billige Meßvorrichtungen zur Verfügung [4]. Der zeitliche Verlauf des Blitz-

stromes läßt sich dagegen nur mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen aufzeichnen¹⁾. Die hohen Kosten für die Beschaffung und Bedienung oszillographischer Meßeinrichtungen für den Blitzstrom bedingen eine sehr beschränkte Anzahl von Meßpunkten, die deshalb sorgfältig ausgewählt werden müssen. Solche Meßpunkte sollen vor allem eine große Blitzeinschlagshäufigkeit aufweisen. Da es bekannt ist, daß sehr hohe Objekte häufiger Blitzschäden erleiden als niedrige, und da in Europa die meisten und heftigsten Gewitter am Rande der Alpen niedergehen, wurden einige Berggipfel in der Schweiz während mehrerer Jahre mit „Stahlstäbchen“ ausgerüstet, um die dort vorhandene Einschlagshäufigkeit zahlenmäßig vergleichen zu können.

Aus diesem Vergleich ging der Monte San Salvatore bei Lugano als einer der Schweizerberge mit größter Blitzeinschlagshäufigkeit hervor. Seine gute Zugänglichkeit mit der Drahtseilbahn von Lugano-Paradiso aus war ein weiterer Grund dafür, daß die Forschungskommission des SEV²⁾ und VSE³⁾ für Hochspannungsfragen 1942 beschloß, auf diesem Berge oszillographische Blitzstrommessungen durchzuführen.

Es muß gleich bemerkt werden, daß die Wahl eines Berges die grundsätzliche Frage aufwirft, ob ein Blitzschlag in einen Berggipfel den gleichen Stromverlauf zeigt wie ein Blitzschlag in das mehr oder weniger flache Tiefland. Diese Frage läßt sich nicht von vornherein beantworten. Es scheint aber möglich, aus den Unterschieden im zeitlichen Verlauf von Blitzströmen und aus der optischen Beobachtung der Vorgänge beim Entstehen und Wachsen des Blitzkanals die Blitze in den Berggipfel und in die Ebene voneinander zu unterscheiden.

*) Prof. Dr. K. Berger ist Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen und Professor für Hochspannungstechnik an der Eidg. Techn. Hochschule in Zürich.

1) Eine kürzlich in den USA durchgeführte Weiterentwicklung des Klydonographen unter dem Namen „Teinograph“ kann nur als notdürftige Ersatzmethode gelten [5].

2) SEV = Schweizerischer Elektrotechnischer Verein.

3) VSE = Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke.

Beschreibung der Blitzforschungsanlagen des Monte San Salvatore

Der Berggipfel des Monte San Salvatore liegt 915 m über dem Meeresspiegel und rd. 640 m über dem Spiegel des Luganer Sees, der seinerseits 275 m über dem Meeresspiegel liegt. Bild 1 zeigt den Grundriß der heute bestehenden Einrichtungen und Gebäude auf dem Berggipfel. Von der Bergstation der Seilbahn aus gelangt man am Berggasthof und am Sendegebäude der PTT⁴⁾ vorbei zum „Antico Albergo“ (alter Gasthof), in dem sich die oszillographischen und sonstigen elektrischen Meßeinrichtungen befinden, dann zur Wallfahrtskirche auf dem Berggipfel („Santuario San Salvatore“) mit der Aussichtsterrasse, unter der sich die photographischen Apparate (ruhende Photokameras und Boys-Kameras) befinden. Ferner sind im Grundriß die beiden Türme 9 und 10 eingezeichnet. Turm 1 liegt rd. 15 m tiefer als der Berggipfel des San Salvatore. Turm 2 dagegen steht auf einem rd. 400 m weiter nördlich befindlichen Vorberg, „San Carlo“ genannt, der rd. 50 m niedriger ist als der Berggipfel.

Bild 2 ist eine Luftaufnahme des einen der beiden Türme und der Gebäude auf dem Berg. Sie zeigt in der Blickrichtung von Norden nach Süden die Wallfahrtskirche

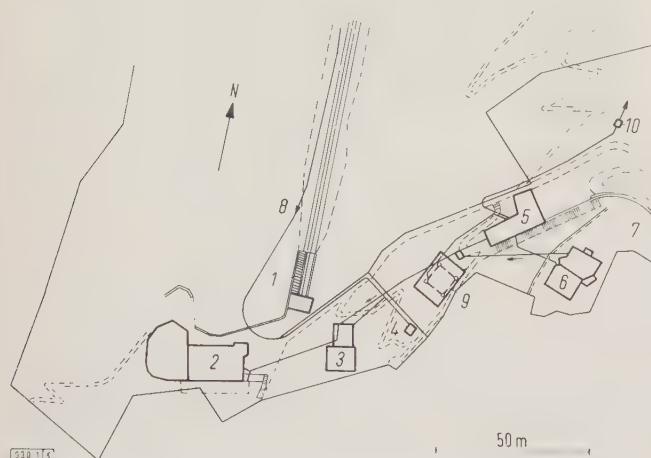


Bild 1. Lageplan der Gebäude, Türme und Verbindungswege auf dem Monte San Salvatore.

- 1 Seilbahnstation
- 2 Berggasthof
- 3 Sendegebäude der PTT
- 4 Wasserbehälter
- 5 „Antico Albergo“, oszillographischer Meßraum
- 6 Wallfahrtskirche auf dem Berggipfel mit Raum für photographische Panorama-Aufnahmen
- 7 Berggipfel-Plateau, 915 m ü. N. N.
- 8 Wasserleitung zum Behälter 4
- 9 Meßturm 1, Sendeturm der PTT, 70 m hoch
- 10 Meßturm 2 auf dem Vorberg San Carlo, 400 m vom Meßturm 1 entfernt, 70 m hoch

auf dem Berggipfel, das Meßgebäude zwischen den Bäumen links vom Turmfuß und den Berggasthof rechts außen. Über den See führt der Damm von Melide. Straße und Bahn folgen dann dem See am Fuße des Monte Generoso, dessen Abhang links noch zum Teil sichtbar ist.

Der Turm 1, wie er von 1943 bis 1957 bestand, war ein Holzturm aus vier Eckbalken von 60 m Höhe zuzüglich einer 10 m hohen Stahlrohrspitze. Dieser nur 40 cm × 40 cm im Geviert messende, sehr schlanke Turm war nach vier Seiten mit Stahlseilen an 12 m langen Holzbalken abgespannt und verankert. Der Nebenschlußwiderstand für die Blitzstrommessungen befand sich auf dem Erdboden. Der Turm 2, der seit 1950 auf dem Vorberg San Carlo steht, ist ein dreiseitiger Stahlrohrturm mit hölzernen Podien für die Unterbringung des Blitzstrom-Nebenschlußwiderstandes und der photographischen Apparate, auf dessen Spitze eine rd. 15 m lange Stahlrohrnadel isoliert eingespannt ist.

Der Holzturm 1 wurde im Frühling 1958 abgebrochen, da er einem Sendeturm der PTT für Kurzwellen und Fern-



Bild 2. Luftbildaufnahme des Monte San Salvatore mit Meßturm in der Blickrichtung nach Norden.

sehen Platz machen mußte. Durch das Entgegenkommen der Direktion der PTT-Verwaltung wurde es möglich, auf dem neuen Sendeturm eine Plattform für den Blitzstrom-Nebenschlußwiderstand mit isolierten Blitzauffangrohren aufzubauen. Bild 3 und 4 zeigen den seit 1958 bestehenden Sendeturm der PTT. Bild 3 ist eine Aufnahme aus dem Flugzeug in Richtung von Osten nach Westen; im Vordergrund ist die Wallfahrtskirche auf dem Berggipfel zu sehen, im Hintergrund sind die Walliser-Alpen (Monte Rosa-Gruppe) sichtbar. Bild 4 zeigt den oberen Teil des Turmes, wie er sich von der Wallfahrtskirche aus zeigt. Man erkennt über den Kurzwellen- und Fernsehantennen das Rohrkreuz und die vertikale Auffangnadel für den Blitzstrom, ferner das oberste Podium für den Nebenschlußwiderstand für die Blitzstrom-Messungen und die Kontrollstäben.

Elektrische Meßeinrichtungen

Alle elektrischen Meßeinrichtungen sind im „Antico Albergo“ untergebracht mit Ausnahme der Nebenschlußwiderstände, die sich auf den beiden Blitzmeßtürmen befinden. Meßraum und Türme sind durch zwei besondere Hochfrequenz-Meßkabel verbunden. Das Prinzip der Messung geht aus Bild 5 hervor.



Bild 3. Luftbildaufnahme des neuen, seit 1958 bestehenden Meßturms 1, Blickrichtung von Osten nach Westen, im Hintergrund die Monte Rosa-Gruppe.

4) PTT = Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung.

Wenn der Blitz die Auffangnadel 1 trifft, fließt der Blitzstrom durch den zweistufigen Meßwiderstand von 0,8 Ω (anfänglich 1,0 Ω) bzw. 0,05 Ω (anfänglich 0,02 Ω) über die gedrehte Eisenkonstruktion des Turmes in die mit Wasserleitungen und dem Bahngelise verbundene Erdung, die aus rd. 400 m Eisendraht von 6 mm Dmr. auf der Bergkuppe besteht. Da mit Blitzströmen zwischen 10 A und 100 kA zu rechnen ist, war es nötig, einen zweistufigen Meßwiderstand zu benutzen. Den beiden Meßwiderständen vorgeschaltet ist eine besondere Funkenstrecke 2 mit einer parallelgeschalteten Kapazität C, deren Ableitung zur Messung der kleinen Glimmströme (Elmsfeuer) der Turmspitze sowie der Auslösung der Oszillographen für die kleinen Strombereiche dient.

Der 0,8- Ω -Meßwiderstand 3 besteht aus 6 bis 8 parallelgeschalteten, induktionsarmen gewickelten Konstantanbändern von je 30 mm \times 0,5 mm Querschnitt mit einem Gesamtgewicht der Konstantans von rd. 45 kg. Der früher benutzte 1,0- Ω -Widerstand bestand aus zwei bifilaren Lagen eines isolierten Konstantanbandes von 27 mm \times 0,7 mm Querschnitt mit einem Gesamtgewicht von rd. 18 kg. Dieser Widerstand war dem Blitzstrom nicht gewachsen, denn es entstanden nach wenigen Jahren Schäden infolge thermischer und elektrodynamischer Überlastung.

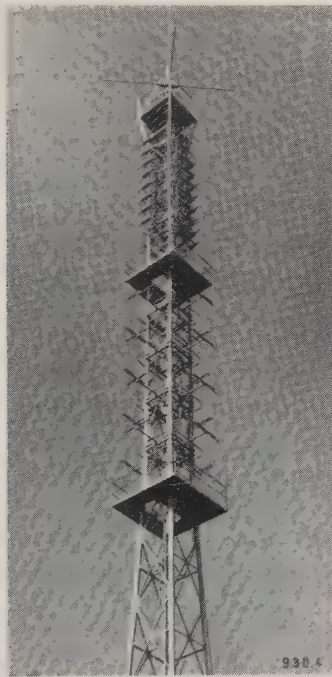


Bild 4. Oberer Teil des Meßturmes 1, von der Wallfahrtskirche aus gesehen.

Schleifen-Oszillographen zugeführt wird. Mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen ist es möglich, den zeitlichen Verlauf kürzester Stromspitzen aufzuzeichnen. Mit dem Schleifen-Oszillogramm kann bei solchen Stromspitzen lediglich der Stromscheitelwert über die Speicherschaltung gemessen werden.

Die Vorfunkensstrecke 2 bewirkt, daß kleine Glimmströme der Turmspitze über einen Widerstand zwei Registrierinstrumenten 16 zugeführt werden. Diese registrieren positive und negative Glimmströme bis ± 10 mA dauernd während der ganzen Gewitterperiode. Der Vorschub des Registrierpapiers beträgt 100 mm/h, so daß Zeitabstände von 10 bis 20 s noch ersichtlich sind. Da sich Blitzschläge in einigen Kilometern Entfernung als scharfe Stromspitzen kennzeichnen, gibt die Glimmstrom-Registrierung ein ausgezeichnetes Bild der gesamten Gewittertätigkeit in der Umgebung des San Salvatore. Die Funkenstrecke 2 spricht bei rd. 5 bis 10 kV an. Dies entspricht einem Blitzstrom von 10 bis 20 A. Größere Ströme fließen über die Meßwider-

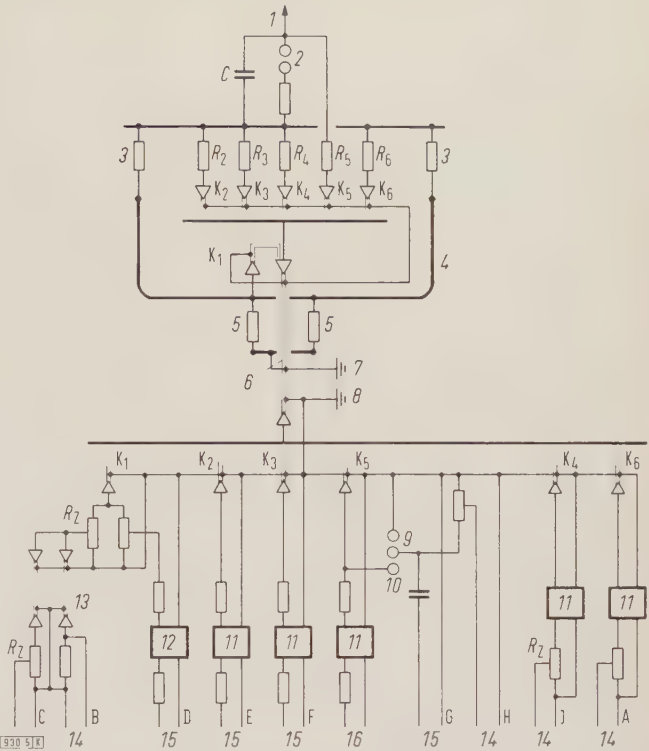


Bild 5. Prinzipschaltbild der Blitzstrommessung.

- 1 Nadelantenne (isolierte Turmspitze von 10 bzw. 15 m Höhe)
- 2 Funkenstrecke mit magnetischer Blasung, rd. 1 mm Schlagweite
- 3 Nebenschlußwiderstand von 0,8 Ω auf den Türmen
- 4 Metallkasten
- 5 Nebenschlußwiderstand von 0,05 Ω auf den Türmen
- 6 Meßkabel zum Meßturm, Länge 125 m bei Turm 1, 500 m bei Turm 2
- 7 Erdung an der Turmkonstruktion
- 8 Erdung an dem Faraday-Käfig des Meßraumes
- 9, 10 Funkenstrecke mit 1200 V bzw. 3500 V Ansprechspannung
- 11 Amplitudenbegrenzer
- 12 Speicherschaltung zur Messung des Stromscheitelwertes mit dem Schleifen-Oszillographen
- 13 Verzögerungskabel
- 14 zum Kathodenstrahl-Oszillographen
- 15 zum Schleifen-Oszillographen
- 16 Registrierinstrument für Glimmstrom
- K1 bis K6 Adern des Turmkabels
- C Messung bis 1 kA mit Kathodenstrahl-Oszillographen
- B Messung bis 50 kA
- A Messung bis 150 kA
- D Messung des Stromscheitelwertes mit Schleifen-Oszillograph bis 150 kA (getrennte Schleifen für positiven und negativen Stoß)
- E Messung bis 5 kA
- F Messung bis 300 A
- G Auslösung des Schleifen-Oszillographen für die Lichtquellen
- H Auslösung der Teilhelligkeit des Kathodenstrahl-Oszillographen
- J Auslösung der Kippablenkung des Kathodenstrahl-Oszillographen

stände 3 und 5 und werden somit von Schleifen-Oszillographen und Kathodenstrahl-Oszillographen gemessen.

Die empfindliche Oszillographenschleife G und die Schleife des kleinsten Strombereiches des Kathodenstrahl-Oszillographen werden ausgelöst, sobald die kleinen Ableiterfunkenstrecken 9 und 10 ansprechen. Dies geschieht bei 1200 bis 1500 V, d. h. bei einem Blitzstrom von rund 1500 V : 300 Ω = 5 A. Beim Schleifen-Oszillographen wird bei diesem Strom die besonders hierfür entwickelte Wolfram-Bogenlampe innerhalb weniger Mikrosekunden gezündet. Beim Kathodenstrahl-Oszillographen wird innerhalb 1 μ s eine Teilhelligkeit der Kathodenstrahlen ausgelöst.

Die zeitliche Auflösung der Oszillogramme („Zeitablenkung“) geschieht zunächst beim Schleifen-Oszillographen und beim Kathodenstrahl-Oszillographen durch eine mechanische Bewegung des Photopapiers. Dieses befindet sich auf einer Metalltrommel mit 1 m Umfang, die sich normalerweise einmal je Sekunde dreht. Die zeitliche Auflösung beträgt somit 1 mm/ms. Auf diese Weise können die kleinen Blitzströme langer Dauer erfaßt werden. Dagegen ist es damit nicht möglich, den Verlauf der rasch veränderlichen Stoßstrom-Komponenten des Blitzes zu er-

fassen, weil hier Zeiten von 1 μ s und, wenn möglich, sogar noch darunter erfaßt werden müssen. Zu dem Zweck wird der langsamen mechanischen Zeitablenkung eine rasche elektrische Zeitablenkung in derselben Richtung überlagert. Sie besteht in einer Kippablenkung, die für einen Hin- und Rücklauf wahlweise rd. 20/100 μ s oder 200/1000 μ s benötigt. Diese Kippablenkung darf nur dann ausgelöst werden, wenn im Blitzstrom rasch ansteigende Stoßströme vorkommen. Dies geschieht über die Widerstände R_4 und R_Z , die eine Kippschaltung des Kathodenstrahl-Oszillographen innerhalb von 0,5 μ s zum Kippen bringen (J). Während der Kippablenkung muß der Kathodenstrahl aufgehellt werden, damit bei der hohen Schreibgeschwindigkeit seine Spur noch sichtbar wird. Dies geschieht ebenfalls mittels der Elektronik des neuen besonderen Blitzstrom-Kathodenstrahl-Oszillographen⁵⁾.

Die zwischen den Nebenschlußwiderständen 3 und 5 auf den beiden Türmen und in dem Metallkasten 4 befindlichen Meßkabel K sind besondere Polyäthylenkabel mit besonders gut leitendem Kupfermantel, weil der Blitzstrom gerade dann gemessen wird, wenn dieser zum großen Teil über den Kabelmantel abfließt. Der Mantel muß die Meßadern gut abschirmen, so daß an seiner Innenhaut kein störender Spannungsabfall mehr entsteht [6].

Photographische Einrichtungen

Die photographische Beobachtungsstation befindet sich in einem Zwischenboden unter der Aussichtsterrasse über dem Chor der Wallfahrtskirche. Sie besteht im Prinzip aus acht Leica-Kameras mit elektrisch ferngesteuerten Verschlüssen, ferner aus einer Anzahl besonders hierfür gebauter Boys-Kameras mit mehr oder weniger rasch bewegtem Photofilm oder Photopapier. Auf dem Turm 2 auf dem San Carlo befindet sich ebenfalls eine Kleinbild-Kamera (Robot-Kamera) mit ferngesteuertem Verschuß. Außerdem kann in dem dort vorhandenen Schutzkasten auf dem Turm auch eine Boys-Kamera eingebaut werden.

Die acht Photoapparate auf dem Berggipfel erlauben während der Dunkelheit, alle Blitze rund um den San Salvatore photographisch festzuhalten, indem der Verschuß dauernd offengelassen und der Film von Zeit zu Zeit vorgeschoben wird. Es gelingt auf diese Weise, mit den mechanisch fixierten Apparaten die genaue Lage vieler Blitzeinschlagstellen um den Monte San Salvatore festzuhalten. Dies schafft die Möglichkeit, später auf statistischer Grundlage die Frage objektiv zu beantworten, ob ein Zusammenhang zwischen Einschlagshäufigkeit und Topographie oder Einschlagshäufigkeit und geologischer Bodenbeschaffenheit besteht, wie es der Volksmund oft behauptet und noch nie objektiv nachgewiesen werden konnte. Die Robot-Kamera⁶⁾ auf dem Turm 2 erlaubt die Aufnahme aller während der Dunkelheit stattfindenden Blitzeinschläge in den Turm 1. Der Filmvorschub geschieht durch Fernsteuerung.

Als Boys-Kameras wurden zwei Typen entwickelt und gebaut, nämlich eine „langsame“ und eine „rasche“. Bei der ersten bewegt sich die auf einer Filmtrommel von 1 m Umfang befindliche Photoschicht mit rd. 3 m/s. Bei der zweiten wurde zuerst eine Filmgeschwindigkeit von 50 m/s angewendet, die sich aber als zu hoch erwies, so daß sie auf die Hälfte vermindert werden mußte. Diese Boys-Kameras dienen bekanntlich dazu, das Entstehen und Vorwachsen des Blitzkanals sichtbar zu machen. Da die Vorladung, die beim Vorwachsen des Blitzes entsteht, sehr lichtschwach ist, kann mit den bisherigen Mitteln das ruckweise Vorwachsen des ersten Teilblitzes nur selten erkannt werden; hingegen gelingt es häufig, das glatte Vorwachsen späterer Teilblitze zu erkennen.

⁵⁾ Dieser Kathodenstrahl-Oszillograph konnte mit der finanziellen Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds für wissenschaftliche Forschung entwickelt werden. Er wurde von der Firma P. E. Klein in Teitnang nach den Wünschen des Verfassers gebaut und kam im Sommer 1958 erstmals in Betrieb.

⁶⁾ Die Anschaffung dieser Kleinbildkameras wurde ebenfalls mit der finanziellen Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds für wissenschaftliche Forschung möglich.

Ein besonderes Hindernis für die Photographie dieser sehr lichtschwachen Entladungen bildet der von der nächtlichen Beleuchtung der Stadt Lugano aufgehellte Nachthimmel. Es scheint, daß diese lang dauernde Vorbelichtung die Photoschicht für nachfolgende schwach leuchtende Entladungen in kurzer Zeit unempfindlich macht, so daß nur während kurzer Zeit vorbelichtet werden darf. Der rasche Wechsel der Photoschicht ist aber leider bei der heutigen Konstruktion der Boys-Kameras nicht möglich.

Einige Beobachtungsergebnisse elektrischer Art

Es kann sich hier nicht darum handeln, die bisherigen Ergebnisse statistisch darzustellen, sondern es sollen nur einige typische Beispiele angeführt werden, die es ermöglichen, sich ein physikalisches Bild des Blitzes zu machen.

Gewitterhäufigkeit

Tafel 1 gibt zunächst einen Anhaltspunkt für die Gewitterhäufigkeit am Monte San Salvatore. Es sind zwei Spalten angegeben: Gewitter innerhalb eines Umkreises von 20 km Radius und rd. 10 km Radius. Die Ziffern in der zweiten Spalte entsprechen dem meteorologischen Begriff der „Anzahl Gewittertage“, d. h. der Anzahl Tage, an denen mindestens einmal Donner gehört wurde. Er entspricht dem internationalen „Isoceraunic level“. Die Ziffern der dritten Spalte wurden auf Grund der Messungen mit Glimmstrom-Instrumenten ermittelt, die Blitze in einem Umkreis bis zu rd. 10 km Radius aus einer Zacke des Stromes der Turmspitze (Verschiebungs- oder Glimmstrom) deutlich erkennen lassen.

Tafel 1. Gewitterhäufigkeit in den Jahren 1955 bis 1960.

Jahr	Anzahl der Gewittertage	
	in einem Umkreis von 20 km Radius („Isoceraunic level“)	in einem Umkreis von 10 km Radius (Glimmstrom-Registrierung)
1955	51	37
1956	50	43
1957	52	41
1958	34	23
1959	50	41
1960	47	39

Nach Tafel 1 war der Sommer 1958 im Tessin außerordentlich gewitterarm. Dies geht auch daraus hervor, daß 1958 keine einzige Blitzaufnahme gelang, weil während der Dunkelheit keine Gewitter in der Nähe vorkamen.

Die Glimmstrommessung an den beiden Turmspitzen gibt ein sehr gutes Maß für das Vorkommen hoher Feldstärken. Ein absoluter Zusammenhang zwischen Glimmstrom und Feldstärke an den Turmspitzen müßte in einer Modellmessung feststellbar sein, bei der die Form des Berges nachgebildet würde. Eine solche Untersuchung wurde bisher nicht durchgeführt.

Bild 6 bis 9 zeigen vier Beispiele von Glimmstrom-Registrierungen an beiden Turmspitzen. Die ersten drei Bilder (Bild 6 bis 8) zeigen das kurzzeitige und rasche Auftreten eines hohen Glimmstromes, der an den beiden 400 m voneinander entfernten Turmspitzen sehr ähnlichen Verlauf aufweist. Immerhin ist in Bild 6 ein Unterschied im ansteigenden Teil ersichtlich, der auf eine lokale Entladung der Ladungswolke in der Nähe von Turm 2 schließen läßt. Auch in anderen Fällen sind oft am Turm 2 raschere Stromänderungen als an Turm 1 zu erkennen, was darauf hinweist, daß erste Entladungen in der Nähe von Turm 2, d. h. über Paradiso, häufiger sind als bei Turm 1 und südlich davon.

Bild 8 läßt die dem Glimmstrom überlagerten Zacken erkennen, die von Blitzeinschlägen in einigen Kilometern Abstand herrühren. Bei entfernten Blitzen haben diese Zacken an beiden Türmen gleiche Form und ähnliche Höhe. Bei einem Einschlag in einen Turm zeigen beide Türme in der Regel Spitzen verschiedener Polarität.

Bild 9 zeigt den Glimmstromverlauf bzw. Feldverlauf nach einem stundenlangen Gewitter mit vielen Blitzen in

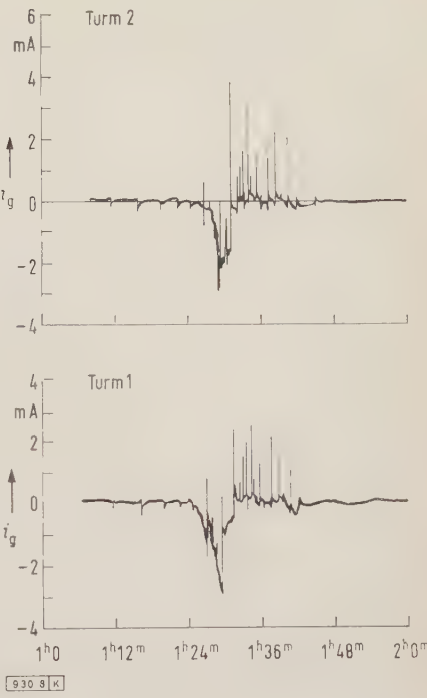
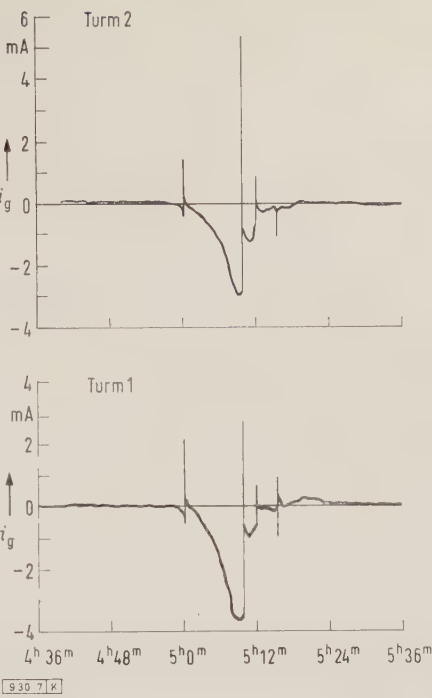
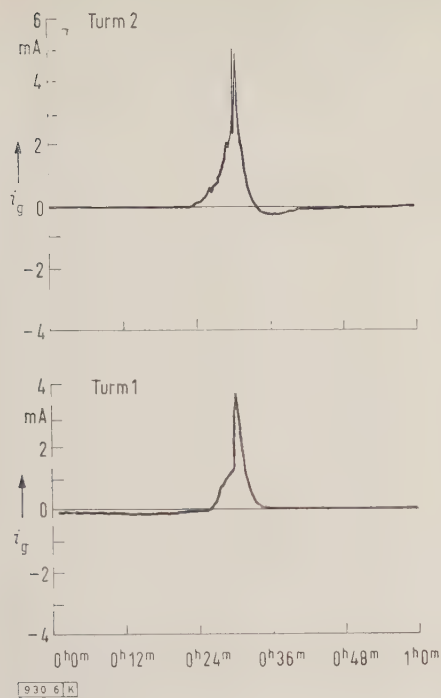


Bild 6. Verlauf des Glimmstromes i_g an beiden Turmspitzen am 31. Mai 1956. Vorüberziehen einer einzelnen Ladungswolke mit einer Entladung bei Turm 2, die sich bei Turm 1 nicht äußert.

Bild 7. Glimmstromverlauf am 7. Juni 1957. Vorüberziehen einer einzelnen Ladungswolke mit vier Entladungen, die sich an beiden Türmen gleichartig äußern.

Bild 8. Glimmstromverlauf am 8. August 1960. Vorüberziehen einer Gewitterwolke mit mehreren Blitzen in der Umgebung.

der Umgebung, aber ohne Einschlag. Der Wechsel überwiegender positiver und negativer Felder ist sehr deutlich. Wäre die Geschwindigkeit der Gewitterwolken bekannt, so könnte daraus die Größe der wesentlichen Ladungsgebiete ermittelt werden.

Diesen Glimmströmen entspricht das Geräusch des Elmsfeuers an den Turmspitzen. Je höher der Glimmstrom ist, um so deutlicher ist das Rauschen an den Spitzen. Sehr oft ist im Anschluß an einen entfernten Blitzschlag ein scharfer Schlag, ähnlich einem Geißelhieb, an den Turmspitzen zu hören. Er deutet darauf hin, daß die Feldstärke dort im Augenblick eines entfernten Blitzes nicht fällt, sondern steigt, und zwar sehr beträchtlich. Es ist aber schwierig zu entscheiden, wie groß der Anteil des Verschiebungstromes und wie groß jener des Glimmstromes im Augenblick eines Blitzes ist, denn die Instrumente können nur den Summenstrom anzeigen, dessen Komponente einmal vom Feldsprung, zum anderen aber von der Feldstärke selbst bedingt ist.

Es scheint, daß durch entfernte Blitzschläge infolge des Feldsprunges nach oben nicht nur erhöhte Glimmströme (Elmsfeuer), sondern unmittelbar auch Büschelentladungen von den Turmspitzen gegen die Wolken ausgelöst werden. Infolge der Blendung durch den Blitz können sie kaum gesehen werden, doch lassen einzelne Blitzaufnahmen Spuren von 50 bis 100 m langen Büscheln erkennen.

Insgesamt läßt sich aus den Glimmstrom-Registrierungen auf einfachste Weise und ohne Anwendung von Verstärkern

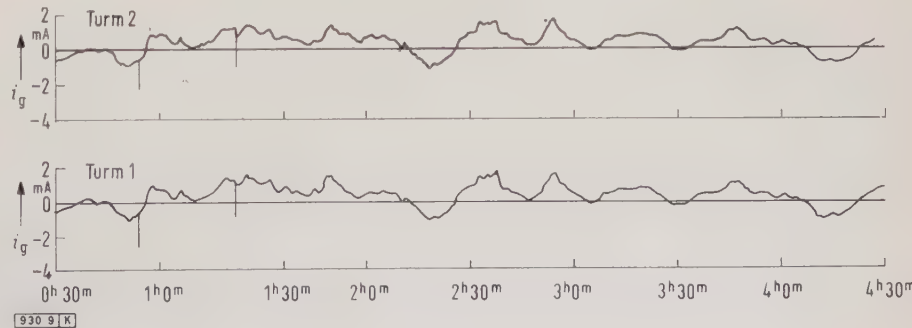
ein fast vollständiges Bild über die Häufigkeit großer Gewitter-Feldstärken und ferner über die Blitzhäufigkeit in der Umgebung gewinnen.

Blitzstrom-Oszillogramme

Der Stromverlauf über die gesamte Dauer eines Blitzes geht aus den Beispielen von Schleifen-Oszillogrammen in Bild 10 bis 14 hervor. In diesen Bildern ist der Stromverlauf während eines Zeitintervalles von einigen Zehntelsekunden bis zu 1,8 s aufgezeichnet. Bild 10, 11 und 12 beginnen mit einem langsam ansteigenden Strom der Größenordnung 100 bis 300 A, der eine bis einige Zehntelsekunden dauert. Diesem Strom sind zum Teil kurzzeitige Stromspitzen von vielen Kiloampere überlagert. In verschiedenen Fällen klingt der kleine Anfangsstrom ohne solche Spitzen wieder auf Null ab und weist dann nach Pausen von hundertstel bis zehntel Sekunden Stromstöße von einigen bis vielen Kiloampere auf. Diese Stromspitzen sind in den Oszillogrammen jeweils in Kiloampere angegeben. Sie sind mittels der Scheitelwert-Speicherschaltung des Schleifen-Oszillographen und mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen gemessen. Bild 12 zeigt einen Blitz mit 17 Teilblitzen mit einer Gesamtdauer von fast 2 s.

Bild 13 und 14 weisen im Gegensatz dazu am Anfang eine kurze und hohe Stromspitze auf, die in der Regel zwischen 10 und 100 kA beträgt. Nachher folgen weitere Stromstöße, zum Teil ohne, zum Teil mit „Stromschwanz“. Die Bilder 10 bis 14 zeigen Entladungen negativer Wolken.

Bild 9. Glimmstromverlauf am Ende eines stundenlangen Gewitters am 21. September 1960 ohne nachfolgende Blitze. Der gleichartige Verlauf an beiden Türmen zeigt, daß es sich um große, hochgelegene Ladungswolken handelt.



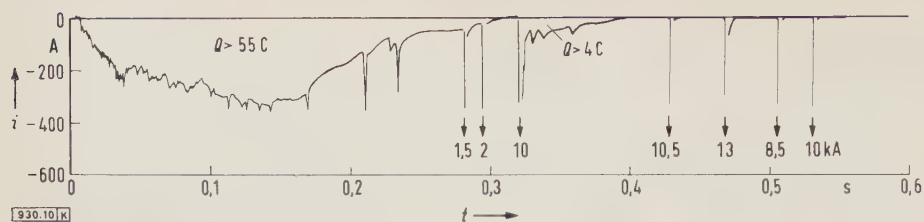


Bild 10. Oszillogramm des Blitzstromes bei einem Blitz aus negativ geladener Wolke vom 23. Juli 1951.

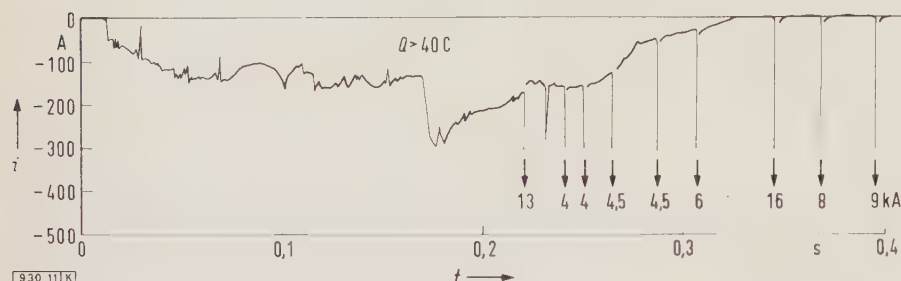


Bild 11. Oszillogramm des Blitzstromes bei einem Blitz aus negativer Wolke, aufgenommen am 21. August 1952.

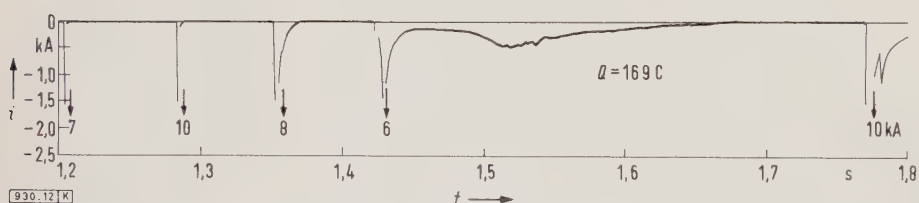
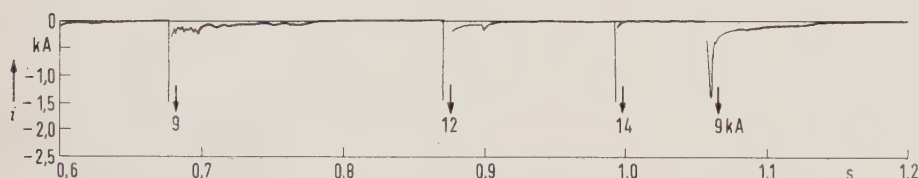
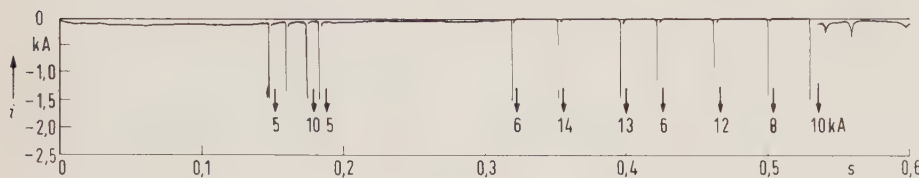


Bild 12. Oszillogramm des Blitzstromes bei einem Blitz aus negativer Wolke, aufgenommen am 29. Juni 1954.

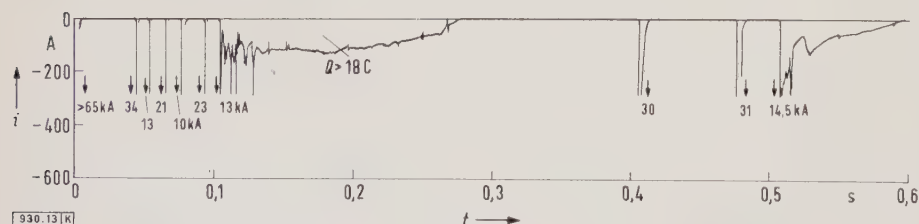


Bild 13. Oszillogramm des Blitzstromes bei einem Blitz aus negativer Wolke, aufgenommen am 29. Juli 1954.

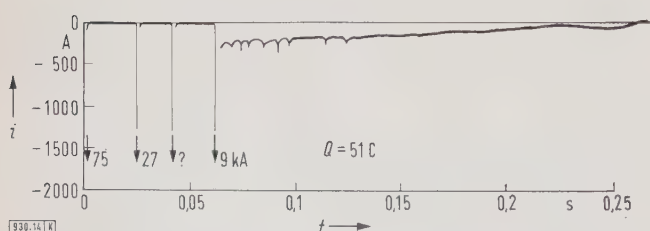


Bild 14. Oszillogramm des Blitzstromes bei einem Blitz aus negativer Wolke, aufgenommen am 12. August 1948.

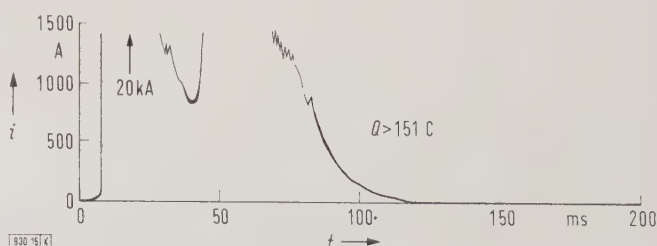


Bild 15. Oszillogramm des Blitzstromes bei einem Blitz aus positiv geladener Wolke am 26. Mai 1950.

Während bei Bild 10, 11 und 12 der erste Teilblitz offenbar von der Turmspitze gegen die Wolke hinaufwächst, zeigen Bild 13 und 14 Blitze, die von der Wolke gegen den Turm herunterwachsen. Der von der Wolke aus mit einer Elektrizitätsmenge in der Größenordnung weniger Coulomb geladene Kanal kann sich dann schlagartig oder — besser gesagt — wellenartig zum Boden entladen: Es entsteht ein Stoßstrom. Da spätere Teilblitze den beim ersten Teilblitz entstandenen Kanal benutzen, sind sie immer stoßartig. Näheres darüber können die mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen gewonnenen Oszillogramme aussagen, die noch besprochen werden.

Im Gegensatz zu den Aufnahmen in Bild 10 bis 14 zeigen Bild 15 bis 17 Entladungen positiver Wolken. Es fällt auf, daß hier stets nur ein einziger Teilblitz auftritt. Die Stromamplitude ist selten sehr hoch, meist beträgt sie einige Kiloampere bis etwa 30 kA. Über Ausnahmen wird noch berichtet. Hierher gehören die seltenen „Gigantenblitze“.

Ausnahmsweise traten auch bipolare Blitze auf, d. h. solche, die zum Teil negativen und positiven Strom führen. Bild 18 zeigt ein Beispiel. Alle bisherigen Aufnahmen von bipolaren Blitzen zeigen zuerst negativen, dann positiven Strom. Zum Teil folgt nachher nochmals ein negativer Strom. Diese Reihenfolge wurde bisher stets eingehalten.

Schließlich soll erwähnt werden, daß es auch außerordentlich schwache Blitze gibt, deren Ströme 20 bis 40 A nicht übersteigen, die aber trotzdem sehr gut sichtbar sind. Ihr Donner ist allerdings viel schwächer als bei den üblichen Blitzen. Bild 19 zeigt den Stromverlauf eines solchen „Schwachstrom-Blitzes“.

Es ist sehr schwer, eine systematische Auswahl aus den Hunderten von Blitzstrom-Oszillogrammen zu treffen, da jeder Blitz wieder anders ist. Weitere Beispiele von Blitzströmen finden sich zum Beispiel in einer früheren Arbeit, welche die Ergebnisse bis zum Jahre 1954 enthält [7, 8].

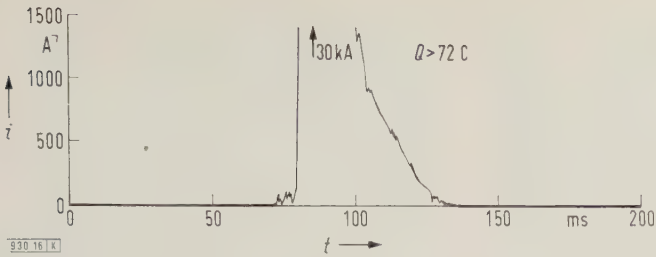


Bild 16. Oszillogramm des Blitzstromes bei einem Blitz aus positiver Wolke, aufgenommen am 17. August 1950.

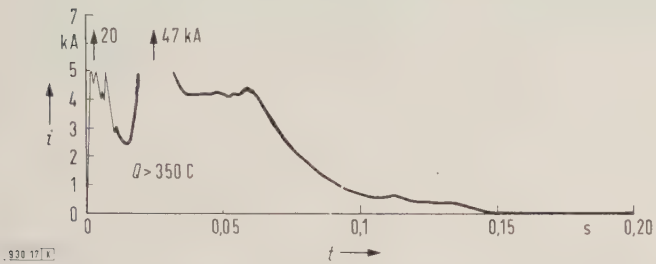
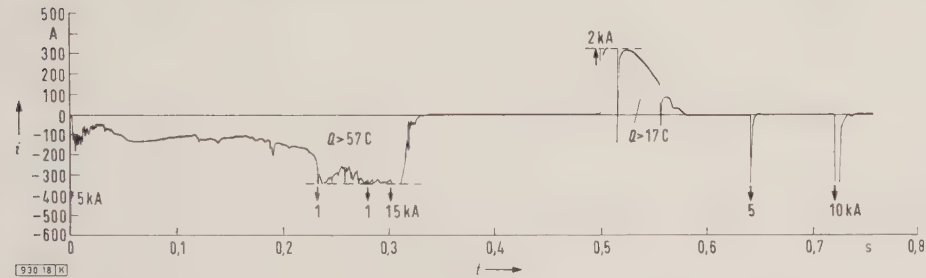


Bild 17. Oszillogramm des Blitzstromes bei einem Blitz aus positiver Wolke, aufgenommen am 28. Juli 1952.



Der Stromverlauf in den kurzzeitigen Blitzstromstößen geht aus dem Beispiel eines Kathodenstrahl-Oszillogrammes hervor (Bild 20). Dieses Bild wurde mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen mit kalter Kathode (Fabrikat TTC)⁷⁾ aufgenommen. Es zeigt den Stromverlauf des ersten Teilblitzes von Entladungen, die von der Wolke zum Turm herunterwachsen. Im übrigen war die Zeitablenkung dieses Kathodenstrahl-Oszillographen nicht für rasch wiederholte Aufzeichnungen geeignet, so daß die meisten späteren Teilblitze nicht aufgezeichnet wurden. Aus diesem Grunde wurde der bereits erwähnte Kathodenstrahl-Oszillograph für Blitzforschung entwickelt und im Sommer 1958 in Betrieb genommen. Mit diesem neuen, besonderen Blitzstrom - Kathodenstrahl - Oszillographen mit abgeschmolzenen Glühkathodenröhren sind die folgenden Oszillogramme aufgenommen worden (Bild 21 und 22).

7) TTC = Trüb, Täuber & Cie, Zürich

Bild 21. Beispiel eines Oszillogramms, das mit dem neuen Blitzstrom-Kathodenstrahl-Oszillographen aufgenommen wurde. Die überlagerte rasche Zeitablenkung hat die Form einer Kippablenkung mit rd. 25/100 μ s Hin- und Rücklaufdauer.
a) Messung am Turm 2,
b) Messung am Turm 1.

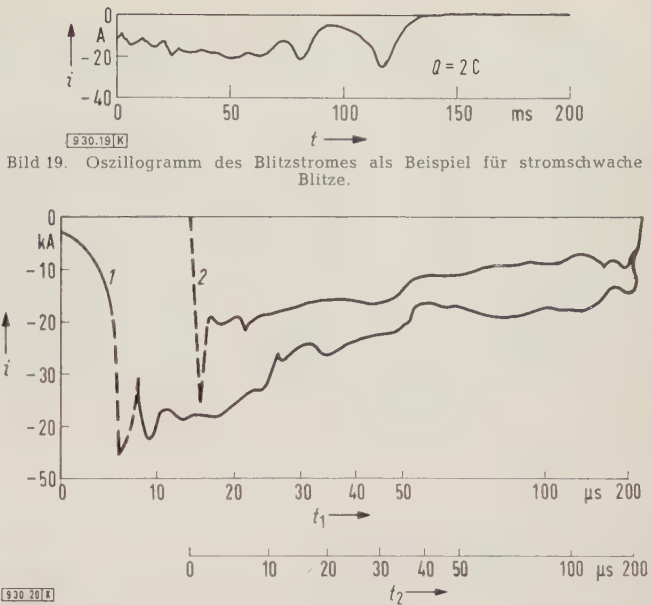
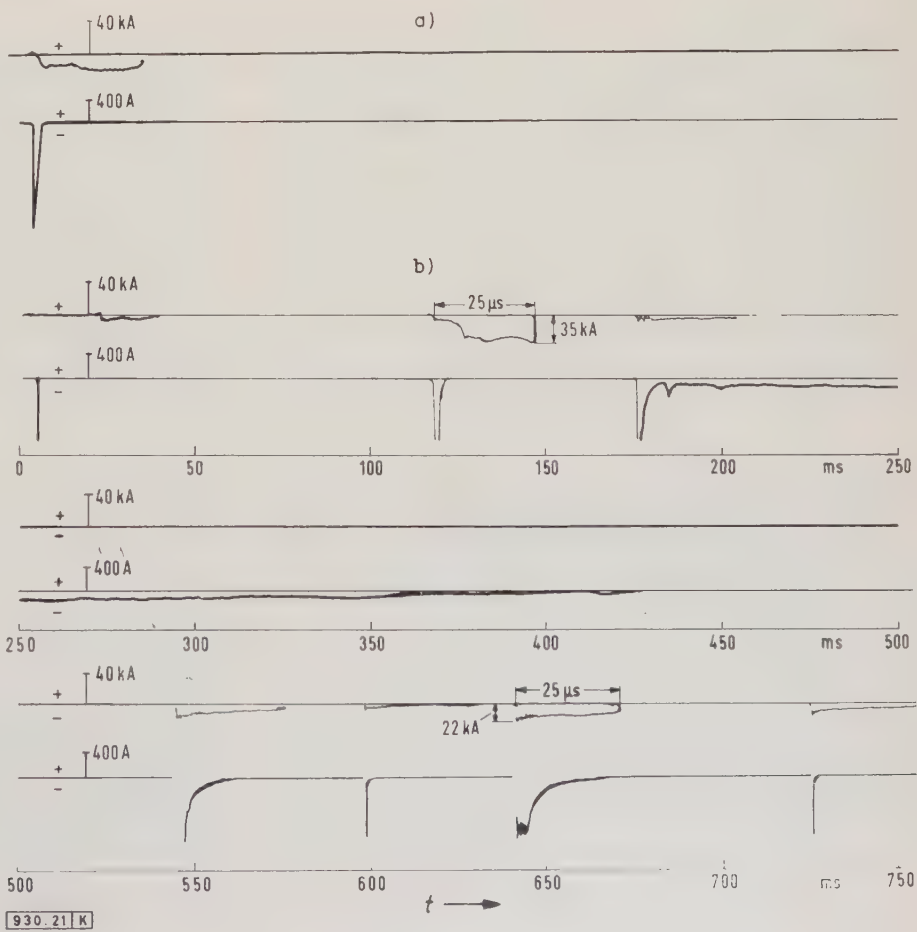


Bild 19. Oszillogramm des Blitzstromes als Beispiel für stromschwache Blitze.

Bild 20. Kathodenstrahl-Oszillogramm als Beispiel von rasch veränderlichen kurzzeitigen Blitzstromstößen, die als Teilblitze allein oder als Überlagerung eines lang dauernden Teilblitzes auftreten.
Kurve 1 gehört zu t_1 , Kurve 2 gehört zu t_2 .

Bild 18. Oszillogramm des Blitzstromes, aufgenommen am 23. Juli 1951.



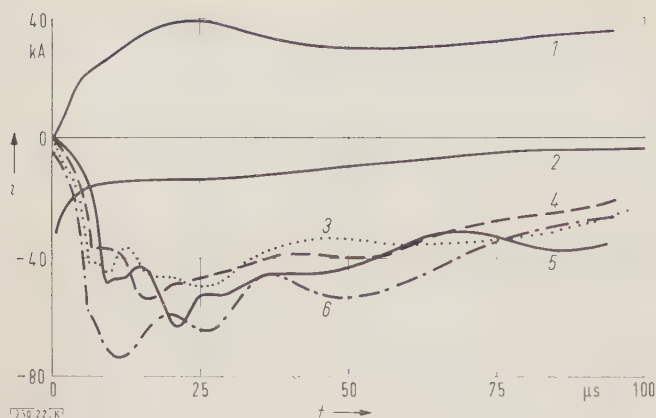


Bild 22. Zeitabhängiger Verlauf des Stromes im ersten Teilblitz nach Aufnahmen im Jahre 1959. Das Diagramm zeigt die charakteristischen Kurvenformen.

- 1 erster Stromstoß nach negativem Vorstrom $I_{\max} = +55$ kA, aufgenommen mit Schleifen-Oszillographen
- 2 zweiter Stromstoß
- 3 bis 6 vier größte Stromstöße im Sommer 1959

In den Oszillogrammen ist der Stromstoß mit Kippablenkung ($25/100 \mu s$) angegeben. Er ist der langsamen Zeitablenkung überlagert. Zwecks größerer Deutlichkeit sind die vier größten Stromstöße des Sommers 1959 in dem Diagramm in Bild 22 zusammengestellt. In allen Fällen handelt es sich um die ersten Teilblitze. Die Front des Stromes ist hier deutlich zu erkennen: Sie ist stets konkav, d. h. der Strom steigt zuerst langsam, dann immer rascher an, bis er einen einigermaßen konstanten Betrag erreicht, wonach er mehr oder weniger exponentiell abfällt. Offenbar entspricht der konkave Stromanstieg der Fangentladung, die vom Turm aus dem Blitzkanal entgegenwächst. Der konstante und dann fallende Teil der Stromkurve entspricht der mehr oder weniger wellenmäßigen Entladung des von der Wolke aus geladenen Blitzkanals mit Seitenästen.

Besonders interessant ist, daß die späteren Teilblitze einen wesentlich steileren Stromanstieg aufweisen als der erste Teilblitz. Im Sommer 1959 war der Kathodenstrahl-Oszillograph ohne Verzögerungskabel angeschlossen, so daß eine Meßdauer von ungefähr $0,5 \mu s$ in den Oszillogrammen in Bild 21 fehlen, wodurch der Anstieg etwas zu steil erscheint. Im Sommer 1960 wurde ein Verzögerungskabel (rd. $1,5 \mu s$) mit einem genauen und reflexionsfreien Anschluß des Kathodenstrahl-Oszillographen benutzt. Dabei zeigte sich eine gesamte Frontdauer der späteren Teilblitze von fast durchweg rd. $1 \mu s$. Diese Dauer ist wesentlich kürzer als beim ersten Teilblitz. Es läßt sich nicht entscheiden, ob diese

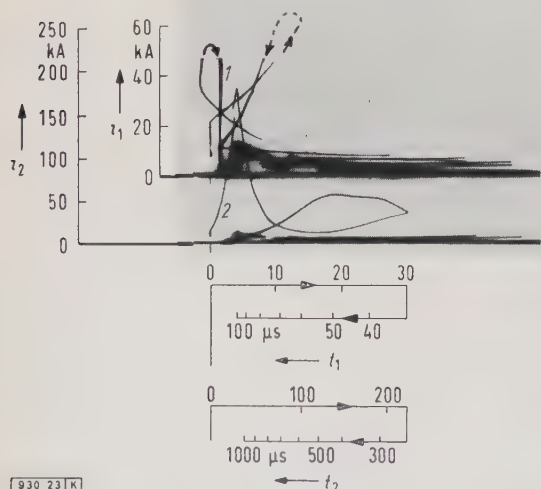


Bild 23. Oszillogramm eines positiven „Gigantenblitzes“ vom 12. August 1960.

- 1 Nachfolgende Blitzereinschläge (hierzu gehört i_1 und t_1)
- 2 „Blitz-Gigant“ (hierzu gehört i_2 und t_2)

Tafel 2. Kenngrößen der drei sehr starken Einschläge.

Blitz-Nr.	I_{\max} kA	T_H μs	$Q = \int i dt$ C	$\int i^2 dt$ kA ² s
1	+ 180	(400)	50	2,7 (6,5)
2	+ 82	700	55	4
3	+ 58	1150	48	2

Frontdauer durch den Turm mitbedingt ist und im Flachland noch kürzer sein könnte. Die Stromform dieser späteren Teilblitze ist auffallend regelmäßig und glatt.

Als große Ausnahme soll ein außerordentlich starker Blitzschlag („Blitz-Gigant“) erwähnt werden, der sich am 17. August 1960 um 18^h 20^m in Turm 2 ereignete. Bild 23 zeigt das Oszillogramm. Es handelt sich um die Entladung einer positiven Wolke mit einem Strom von mindestens 180 kA. Dabei kam es zu einem Überschlag von der Blitznadel zur Eisenkonstruktion des Turmes 2 über rd. 1 m Holzboden oberhalb des Nebenschlußwiderstandes. Dieser erlitt eine Deformation im 0,8- Ω -Teil, die ihn aber nicht unbrauchbar machte. In den folgenden Minuten fanden noch zwei Einschläge in denselben Turm 2 statt, deren Stromverlauf aus Bild 24 ersichtlich ist. Alle drei Schläge waren abnormal stark, wie aus den Angaben der Tafel 2 hervorgeht.

Die eingeklammerten Werte der Tafel 2 beziehen sich auf den mutmaßlichen Stromverlauf des ersten Blitzes ohne Berücksichtigung des Überschlages am Turm 2. Der Blitz Nr. 2 mit $4 \text{ kA}^2 \text{ s}$ wäre imstande, einen Kupferdraht von rd. 8 mm^2

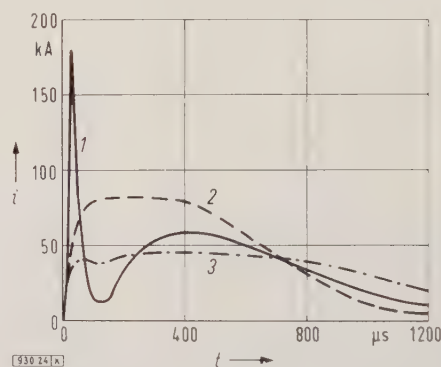


Bild 24. Stromverlauf der drei außerordentlich heftigen Blitzereinschläge vom 12. August 1960. Erläuterungen im Text.

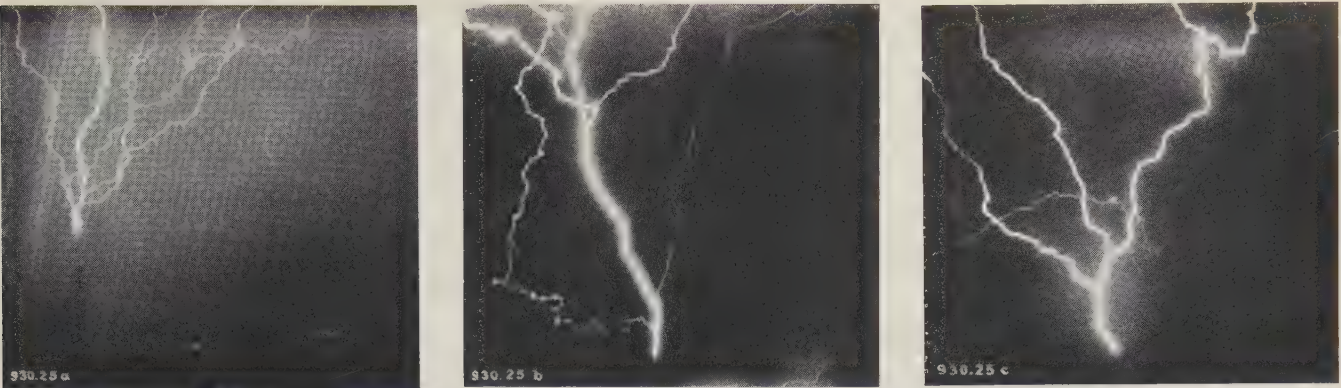
1, 2, 3 Blitz-Nr. nach Tafel 2.

Querschnitt ($3,2 \text{ mm Dmr.}$), der mutmaßliche Strom des Blitzes Nr. 1 mit $6,5 \text{ kA}^2 \text{ s}$ einen Kupferdraht von annähernd 10 mm^2 ($3,6 \text{ mm Dmr.}$) auf seiner ganzen Länge durch Stromwärme zu zerstören [9].

Ähnliche Blitze kamen in der gesamten Beobachtungsperiode von 1945 bis 1960 noch mindestens zweimal vor, was daraus hervorgeht, daß bereits vor einem Jahr das Gewicht des 0,8- Ω -Nebenschlußwiderstands auf Turm 1 von 18 kg auf 45 kg konstant vergrößert werden mußte, und daß früher bereits eine ähnliche Zerstörung auftrat. Es scheint somit, daß alle rd. 6 Jahre mit einer derartigen Beanspruchung auf dem San Salvatore gerechnet werden muß. Auch die Schäden an Stromspulen, die vom Blitzstrom durchflossen wurden, weisen darauf hin, daß die schlimmsten dynamischen und thermischen Beanspruchungen bei der verhältnismäßig seltenen Entladung starker positiver Wolken entstehen.

Photographische Beobachtung der Blitzbildung

Seitdem man weiß, daß sich der Blitz stets in seiner Vorwachsrichtung gabelt oder verzweigt, gibt es zwei Möglichkeiten, die Vorwachsrichtung eines Blitzes zu erkennen. Die einfachere besteht darin, die Verzweigungen des Blitzes zu photographieren, was mit jeder ruhenden Kamera und geeignetem Photofilm möglich ist. Die zweite Methode ist die mit bewegter Photoschicht, z. B. mit der Boys-Kamera.



a) aufgenommen am 23. August 1956,

b) aufgenommen am 11. August 1959,

c) aufgenommen am 15. August 1959.

Bild 25. Aufnahmen von Blitzen, die sich von den Meßtürmen aus nach oben verästel.

Im älteren Schrifttum bemerkt ein englischer Blitzforscher, daß es sehr schwer sei, Lichtbilder von Blitzen zu finden, die sich nach oben gabeln. Unter Hunderten von Blitzphotographien mit deutlichen Verästelungen sei nur eine einzige gewesen, deren Verästelungen nach oben zeigten. Dieses einzige Bild erwies sich als Aufnahme eines Blitzeinschlages in einen hohen Schiffsmast.

Die Photographien der Blitzeinschläge in die Türme des Monte San Salvatore zeigen gar nicht selten nach oben weisende Verästelungen, d.h. Blitze, die von den Türmen gegen die Wolken hinaufwachsen. In Bild 25 sind einige Beispiele gezeigt.

Als Gegenstück zeigen nachstehend einige Bilder Blitze, die von oben nach unten vorwachsen, d.h. deren Verästelungen nach unten weisen (Bild 26). Bild 26 d stammt nicht vom Monte San Salvatore, sondern aus Locarno und ist während des am 1. August üblichen Feuerwerks aufgenommen. Die vielfachen Verästelungen deuten auf starke und weit verteilte Raumladungen hin.

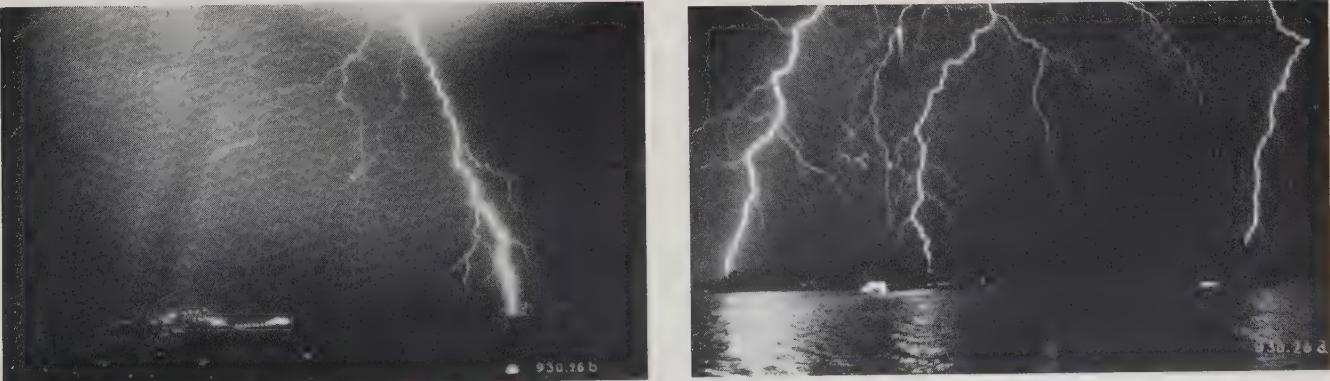
Bei einzelnen Lichtbildern treten starke photographische Umkehreffekte ein: Ein Teil der Seitenäste des Blitzes erscheint dunkel statt hell. Diese Effekte sind dem Photographen bekannt; sie entstehen besonders bei Mehrfachbelichtungen. Dagegen scheint es nicht klar, warum beim gleichen Blitz einige der Äste den Umkehreffekt zeigen, andere nicht.

In Bild 27 sind die bisher photographisch ermittelten Einschlagstellen von Blitzen in der Umgebung des Monte San Salvatore in die Panoramaphotographie des Berges eingetragen. Das Bild bezieht sich auf die Jahre 1955 bis 1959. Im Jahre 1958 entstanden nachts keine Blitze. Da die Methode des dauernden Offenhaltens der Verschlüsse der Kamera nur nachts Aufnahmen ermöglicht, zeigt Bild 27 nur einen Teil aller Einschläge, schätzungsweise $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$. Die Eintragung der Einschlagstellen in die geographische Karte liefert die Grundlage für die Beurteilung gegebenenfalls vorhandener charakteristischer Merkmale der Einschlagstellen. Diese Auswertung steht noch bevor.



a) aufgenommen am 22 Juni 1954,

c) aufgenommen am 11 August 1959,



b) aufgenommen am 25. Juli 1959,

d) aufgenommen am 1. August 1950

Bild 26. Lichtbilder von Blitzen, die sich nach unten verästel.

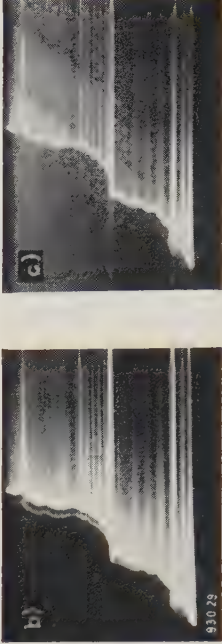


Bild 27 (oben), Panorama mit den Einschlagstellen der nachts aufgenommenen Blitze während der Jahre 1955 bis 1959. Die Ziffern kennzeichnen das jeweilige Jahr (7 B 5 bedeutet 1955).

Bild 28 (links). Mit ruhender Kamera am 29. Juli 1953 aufgenommenen Blitz

Bild 29 (rechts). Derselbe Blitz wie in Bild 28, jedoch mit Bows-Kamera aufgenommen a) erster Teilblitz, b) zweiter Teilblitz und c) dritter Teilblitz.



Die Methode der Blitzphotographie mit Boys-Kamera zeigt wesentlich mehr Einzelheiten der Blitzbildung als Aufnahmen mit der ruhenden Kamera. Die schönste Aufnahme, die bisher auf dem Monte San Salvatore gelang, ist in Bild 28 (mit ruhender Kamera) und in Bild 29 (mit Boys-Kamera aufgenommen) wiedergegeben. Bild 29 zeigt das Vorwachsen eines Blitzes aus der Wolke gegen den Turm 2 und den Erdboden, und zwar beim ersten Teilblitz stufenweise, beim zweiten und dritten Teilblitz ohne Abstufungen und wesentlich rascher als beim ersten Teilblitz.

Als Gegenstück hierzu zeigt Bild 30 als Beispiel das Vorwachsen einer Entladung aus der Turmspitze 2 nach oben gegen die Wolken. Ein eigentlicher Blitz ist aus dieser Entladung nicht entstanden; es handelt sich um rd. 100 m lange Büschel.

Bisher sind dem Verfasser nur wenige gute Aufnahmen des Vorwachsens des ersten Teilblitzes gelungen. Alle diese Vorentladungen sind sehr lichtschwach, so daß sie nur bei günstigen Verhältnissen auf den Film zu bekommen sind. Die Untersuchungen gehen in dieser Richtung weiter.

Der Vergleich der Photographien des Vorwachsens der Blitze mit den Oszillogrammen scheint zu zeigen, daß das erste Vorwachsen des Blitzes nach oben den Oszillogrammen mit einem anfänglichen „Gleichstrom“ in der Größenordnung von wenigen 100 A entspricht, das Vorwachsen des ersten Teilblitzes von der Wolke nach unten dagegen mit dem anfänglichen „Stoßstrom“ im Oszillogramm übereinstimmt. Spätere Teilblitze sind rascher und steiler im Stromanstieg.

Kurz zusammengefaßt, ergibt sich folgendes. Die Blitzstrom-Messungen zeigen zusammen mit den Blitzphotographien, daß es auf Bergspitzen und hohen Türmen oder Schiffsmasten Blitzarten gibt, die im Tiefland nicht vorkommen, nämlich vom Erdboden nach den Wolken vorwachsende Blitze. Der erste Teilblitz dieser Bergblitze kann mit einem einfachen Blitzableiterdraht harmlos gemacht werden. Wenn weitere Teilblitze nachfolgen, so sind diese jedoch nicht anders und nicht weniger gefährlich als in der Ebene, weil sie mit einem Stoßstrom einsetzen.

Allgemeine Folgerungen aus den Blitzmessungen.

Die bisherigen Blitzmessungen zeigen physikalisch und bezüglich der theoretischen Möglichkeiten des Blitzschutzes folgende Ergebnisse:

1. Trotz der starken Elmsfeuer an den Turmspitzen entsteht eine beträchtliche Anzahl Einschläge in die Türme. Von einer Verhinderung des Blitzeinschlages durch präventive Glimmentladungen kann keine Rede sein.

2. Das Blitzschutzproblem besteht ausschließlich darin, das Abfließen des Blitzstromes bei einem Blitzeinschlag harmlos zu machen. Bezüglich Personengefährdung heißt dies vor allem, daß der menschliche Körper vor dem Durchgang gefährlicher Ströme geschützt werden soll. Gefährliche Ströme sind nach Dalziel [10] Stoßströme der Größenordnung 10 A bei 1000 μ s Dauer oder 100 A bei 10 μ s Dauer des Stromes. Der Schutz gelingt dadurch, daß die Berührungsspannung, die bei einem Menschen zwischen den Händen oder zwischen Hand und Fuß gegebenenfalls vorhanden ist, klein genug bleibt, damit über den Körperwiderstand von rd. 1000 Ω kein gefährlicher Strom entsteht. Damit beschränkt sich das Gefährdungsproblem auf ein Problem der Berührungsspannungen.

Diese Berührungsspannungen sind nun bei den Blitzstromstößen infolge der Spannungsabfälle an den Blitzstromableitungen eines Gebäudes überwiegend induktiver Art, wie folgende Abschätzung zeigt: Bei einem Blitzstrom von 50 kA, der eine Frontdauer von 5 μ s und damit einen mittleren Stromanstieg von 10 kA/ μ s hat, entstehen in einem 10 m langen Kupferdraht von 8 mm Dmr. folgende Spannungsabfälle:

ohmscher Spannungsabfall

$$iR = 50 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \frac{1}{50} \cdot \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{10 \text{ m}}{50 \text{ mm}^2} = 200 \text{ V},$$

induktiver Spannungsabfall bei einer Induktivität von 1 ... 2 μ H je Meter

$$L di/dt \approx (1 \dots 2) \cdot 10^{-6} \text{ H/m} \cdot 10 \text{ m} \cdot 10^4 \text{ A}/\mu\text{s} = (100 \dots 200) \text{ kV}.$$

In bezug auf die Berührungsspannungen sind daher dicke und dünne Drähte praktisch gleichwertig, da deren Induktivität L nur unwesentlich vom Drahtdurchmesser abhängt und R vernachlässigt werden kann. Auch die Verwendung von anderen Metallen, sogar Eisen, spielt kaum eine Rolle, da das magnetische Innenfeld im Eisen in der Regel klein bleibt gegenüber dem Außenfeld in Luft. Dagegen nutzt es, die Anzahl Ableitungen zu vergrößern. Bei n Ableitungen vermindert sich der Strom je Ableitung auf $1/n$ und ebenso der Spannungsabfall, sofern die Drähte nicht allzu nahe beisammen sind [11]. Der Grenzfall besteht in der Anwendung unendlich vieler Ableitungen, d. h. eines geschlossenen Metallkäfigs. Seit den Versuchen Faradays wissen wir, daß innerhalb eines solchen geschlossenen Metallkäfigs hoher Leitfähigkeit überhaupt keine elektrischen Spannungen von außen her auftreten können („Faraday-Käfig“).

Den vollkommensten Schutz bietet zweifellos der geschlossene Metallkäfig. Einen annähernd gleich hohen Schutz gewähren aber auch engmaschige Drahtgitter oder Drahtkäfige, wie sie z. B. bei armierten Betonbauten vorkommen. Versuche an Armierungen haben gezeigt, daß die üblichen Bindedrähte den Blitzstrom genügend übertragen, ohne daß die Gefahr von Splitterbildung besteht [12]. Das ganze Problem reduziert sich bei armierten Betonbauten auf die konstruktive Ausbildung der Verbindung der Blitzaufgang-Leitungen mit dem oberen Ende und der Erdung mit dem unteren Ende der Armierung.

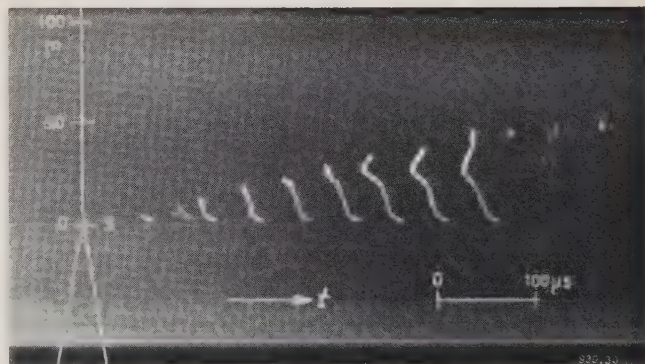


Bild 30. Vorwachsen einer Entladung aus der Spitze S des Turmes 2 nach oben

Bei blitzgeschützten Gebäuden sind nach den neuen schweizerischen Regeln mindestens zwei Ableitungen vorhanden, was schon wesentlich besser ist als eine einzige. Ferner sind Ringerdungen unvergleichlich besser als Platten- oder Rohrerdungen, weil sie bereits eine bescheidene Käfigwirkung ergeben.

Für die in einem geschützten Gebäude befindlichen Personen sind nur die vorstehend genannten Spannungsabfälle maßgebend, sofern alle wesentlichen Metallteile des Gebäudes, insbesondere dessen Wasserleitungen, mit dem Blitzableiter verbunden oder vermascht sind. Für außerhalb stehende Personen oder für die von weither kommenden elektrischen Leitungen (Starkstrom und Telefon) tritt auch der Spannungsabfall des Blitzstromes i im Erdungswiderstand R_e als Spannungs Differenz in Erscheinung. Im Tiefland kann diese Spannung ($i R_e$) durch eine gute Erdung auf die Größenordnung 100 kV vermindert werden. Im Hochgebirge ist dies ausgeschlossen, weil Erdungswiderstände von weniger als einigen 100 Ω kaum hergestellt werden können. Dort entsteht unumgänglich an dem Gebäude mit

Zuleitungen durch den Blitzschlag eine sehr hohe Spannung. Im Gebäude selber kann, wie dargelegt wurde, durch eine genügende Vermaschung der das Haus umfassenden Ableitungen und eine „Ringerdung“ trotzdem ein sehr guter Schutz gegen Blitzeinwirkungen erreicht werden. Dagegen müssen die talseitigen Enden der Leitungen das Abfließen der Überspannungsladungen über Ableiter ermöglichen.

3. Für den Blitzschutz von Hochspannungsanlagen kommt in ähnlicher Weise wie beim Blitzschutz von Gebäuden dem Zusammenlegen aller Erder und aller zugänglichen Metallteile einer Anlage größte Bedeutung zu. Damit wird grundsätzlich der Spannungsabfall ($i R_c$) bedeutungslos, da alle Anlagenteile gleichzeitig auf die gleiche Spannung gehoben werden und somit keine wesentlichen Spannungsdifferenzen entstehen. Aus der großen Steilheit der Blitzströme ergibt sich die große Bedeutung kleiner Abstände zwischen Spannungsbegrenzer (Überspannungsableiter) und zu schützendem Objekt (in der Regel Transformator). Wenn schon mit Blitzströmen der Größenordnung 20 kA in den Anlagen gerechnet wird, so muß auch mit Spannungsabfällen der Größenordnung 2 bis 4 kV/m gerechnet werden. Bei 20 m Entfernung des Schutzes vom Einschlagsort bedeuten das dann, daß 40 bis 80 kV mehr Spannung am zu schützenden Objekt als am Ableiter liegen. Die Koordination von Isolationen ist daher nur für einen recht kleinen „Schutzbereich“ der Ableiter möglich.

4. Der Blitzschutz von Niederspannungsanlagen bedingt infolge der genannten induktiven Spannungsabfälle den Einbau der Ableiter unmittelbar an den Klemmen des zu schützenden Objektes. Eine Koordination aller Isolationen, z. B. eines gesamten Gebäudes, mit einem vorgeschalteten Ableiter im Sinne der Hochspannungs-Koordination ist wegen der induktiven Spannungsabfälle auf den Ableiterzuleitungen, die dort ein hohes Vielfaches der Ableiter-Restspannungen betragen, schlechterdings unmöglich, insbesondere dann, wenn Nulleiter im Gebäude zusätzlich wieder geerdet werden. Dagegen ist der Schutz einzelner Verbraucherobjekte möglich, ferner kann bei exponierten Gebäuden (z. B. Berggasthöfen, abgelegenen Häusern mit langer Zuleitung usw.) die Häufigkeit von Schäden durch Blitzschläge in die Zuleitung mit Hilfe von Ableitern wesentlich vermindert werden.

Ausblick

Die heutige Forschung am Monte San Salvatore konzentriert sich auf zwei Aufgaben:

1. mehr statistische Werte über die Steilheit des Stromanstieges beim ersten Teilblitz und bei den späteren Teilblitzen zu ermitteln. Nachdem es sich gezeigt hat, daß die späteren Teilblitze wesentlich steiler sind als der erste Teilblitz, kommt ihnen praktische Bedeutung zu.

2. weitere statistische Erfassung der genauen Einschlagspunkte von Blitzen durchzuführen. Auf Grund der Ermittlung einer großen Anzahl Einschläge in ein begrenztes Gebiet, wie das beim San Salvatore der Fall ist, wird sich entscheiden lassen, ob ein Zusammenhang mit der Topographie oder Geologie des Bodens besteht, oder ob mit einer rein zufälligen Lage der Einschlagstellen zu rechnen ist. Dabei wird sich auch die Möglichkeit ergeben, die modernen Auffassungen über die Größe des „Schutzraumes“ von Spitzen, Erdseilen und dergleichen auf ihre Richtigkeit zuverlässiger nachzuprüfen, als dies bei Modellmessungen je möglich ist.

Zusammenfassung

Der Verfasser gibt einen Überblick über die wichtigsten Meßeinrichtungen und Ergebnisse der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano. Besprochen werden die Wahl eines Beobachtungspunktes, der Aufbau der Blitzforschungsanlage, die elektrischen Meßeinrichtungen, die photographischen Einrichtungen, einige Beobachtungsergebnisse elektrischer Art, photographische Beobachtungen der Blitzbildung und allgemeine Folgerungen aus den Blitzmessungen.

Aus dem physikalischen Bild, das man sich von der Entstehung und vom Verlauf des Blitzstromes heute auf Grund der elektrischen und optischen Beobachtungen machen kann, werden einige allgemeine Folgerungen für den Blitzschutz von Lebewesen, Gebäuden und elektrischen Anlagen gezogen. Die den Text ergänzenden Bilder vermitteln ein anschauliches Bild vom Wesen des Blitzes. Abschließend werden die noch ungelösten Probleme gestreift, die besonders die Frage der Einschlagspunkte betreffen.

Schrifttum

- [1] Berger, K.: Die Gewittermessungen der Jahre 1932 und 1933 in der Schweiz. Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 25 (1934) S. 213–229.
- [2] Berger, K.: Resultate der Gewittermessungen in den Jahren 1934/35. Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 27 (1936) S. 145–163.
- [3] Berger, K.: Gewittermessungen der Jahre 1936 und 1937. Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 34 (1943) S. 353–365.
- [4] Baatz, H.: Blitzeinschlag-Messungen in Freileitungen. ETZ-A Bd. 72 (1951) S. 191–198.
- [5] Anderson, J. G., u. Giacomoni, R. U.: The Teinograph. Electr. Engng. Bd. 79 (1960) S. 184–189.
- [6] Berger, K.: Notwendigkeit und Schutzart metallischer Mäntel von Sekundärkabeln. Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 51 (1960) S. 549–563.
- [7] Berger, K.: Die Meßeinrichtungen für die Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore. Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 46 (1955) S. 193–201.
- [8] Berger, K.: Resultate der Blitzmessungen der Jahre 1947–1954 auf dem Monte San Salvatore. Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 46 (1955) S. 405–424.
- [9] Müller-Hillebrand, D.: Über die Beanspruchung und Bemessung von Blitzschutzanlagen. Elektrotechn. u. Masch.-Bau Bd. 77 (1960) S. 345 bis 349.
- [10] Dalziel, Ch.: A study of the hazards of impulse. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. (III) Bd. 72 (1953) S. 1032–1043.
- [11] Lampe, W.: Der Blitzschutz von Hochhäusern. ETZ-A Bd. 80 (1959) S. 201–206.
- [12] Berger, K.: Wirtschaftlicher Blitzschutz armerter Betonbauten. Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 51 (1960) S. 1193–1194.

Beitrag zur Kenntnis der Stoßfestigkeit von Isolierpapieren

DK 621.317.333.8 : 621.315.614.6

Zu den zwecks Senkung der Feuchtigkeitsaufnahme chemisch abgewandelten Zellulosen gehört eine acetylierte Zellulose, für die Papier der Ausgangsrohstoff ist und bei der die Faserstruktur des Papieres noch weitgehend erhalten bleibt¹⁾. Der Verfasser setzt seine Untersuchungen an diesem, unter dem Handelsnamen Isocel vertriebenen Werkstoff fort und vergleicht die elektrische Stoßfestigkeit mit der des Isolierpapieres aus reiner Zellulose. Durch Nachbehandlung im heißen und kalten Kalandrieren kann er auf Dicke, Dichte und Durchlässigkeit der Werkstoffe einen gewissen Einfluß nehmen.

Beim unimprägnierten Werkstoff zeigt sich bei hoher

Luftfeuchtigkeit die Überlegenheit des acetylierten Papieres vor allem bei den dielektrischen Verlusten. Bei dem mit dünnem Isolieröl imprägnierten Werkstoff kann die ungefähr Gleichwertigkeit des acetylierten Papieres in bezug auf Stoßspannungsfestigkeit gezeigt werden. Dabei gelingt es dem Verfasser, zu demonstrieren, daß ein deutlicher Zusammenhang zwischen Luftdurchlässigkeit und Stoßspannungsfestigkeit besteht. In einem ausführlichen Anhang werden die verschiedenen Methoden der Luftdurchlässigkeitsmessung auf Grund von Rechnungen, Messungen und Schrifttumsangaben verglichen.

Man vermißt bei den Durchschlagsversuchen die Angabe der Elektrodengröße und bei Angabe der $\tan \delta$ -Werte die relative Dielektrizitätskonstante, eine Größe, die beinahe noch instruktiver wäre als der $\tan \delta$.

Pt

¹⁾ Nach Dieterle, W.: Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 51 (1960) S. 637–650; 14 B., 5 Taf., 40 Qu.

VERBANDSNACHRICHTEN

VDE

Verband Deutscher Elektrotechniker

Frankfurt a. M. S 10, Stresemannallee 21

Fernruf: 60 341; Fernschreiber (Telex): 04-12 871;

Telegramm-Kurzanschrift: Elektrobund;

Postscheckkonto: Frankfurt a. M. 388 68.

Entwürfe VDE 0545 „Bestimmungen für Widerstand-Schweißeinrichtungen“

Teil 1 „Regeln für einphasige Punkt-, Buckel- und Nahtschweißeinrichtungen“ und

Teil 2 „Regeln für einphasige Stumpf-Schweißmaschinen“

Die VDE-Kommission „Widerstands-Schweißgeräte“ unter Vorsitz von Obering. *Rietsch* hat 2 Entwürfe „Bestimmungen für Widerstands-Schweißeinrichtungen“ Teil 1 „Regeln für einphasige Punkt-, Buckel- und Naht-Schweißeinrichtungen“ und Teil 2 „Regeln für einphasige Stumpf-Schweißmaschinen“ ausgearbeitet. Es ist beabsichtigt, diese Entwürfe am 1. April 1962 in Kraft zu setzen.

Die Entwürfe können unter der Bezeichnung VDE 0545 Teil 1/...61 Entwurf 1 und VDE 0545 Teil 2/...61 Entwurf 1 vom VDE-Verlag, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, zum Preise von je 1,50 DM bezogen werden.

Einsprüche gegen die Entwürfe sowie gegen den geplanten Termin für die Inkraftsetzung können bis zum 15. Juni 1961 der VDE-Vorschriftenstelle, Frankfurt a. M., Stresemannallee 21, eingereicht werden (doppelte Ausfertigung erbeten).

Der Vorsitzende
Rietsch

VDE-Vorschriftenstelle
Weise

Entwurf einer Änderung k von VDE 0620 „Vorschriften für Steckvorrichtungen bis 750 V 100 A“

Der VDE-Arbeitsausschuß „Schalter und Steckvorrichtungen“ der VDE-Kommission „Installationsmaterial“ hat unter Vorsitz von Obering. *König* den Entwurf k von VDE 0620 ausgearbeitet und diese Vorschriften damit an den Stand der Technik angepaßt. Es ist beabsichtigt, diese Änderung am 1. September 1961 in Kraft zu setzen.

Der Entwurf der Änderung kann unter der Bezeichnung VDE 0620 k/...61 vom VDE-Verlag, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, zum Preise von 0,90 DM bezogen werden.

Einsprüche gegen diesen Entwurf sowie gegen den geplanten Termin für die Inkraftsetzung können bis zum 15. Juni 1961 bei der VDE-Vorschriftenstelle, Frankfurt a. M., Stresemannallee 21, eingereicht werden (doppelte Ausfertigung erbeten).

Der Kommissionsvorsitzende
Lindner

VDE-Vorschriftenstelle
Weise

Entwurf VDE 0664/...61 „Leitsätze für Fehlerstrom-Schutzschalter bis 500 V Wechselspannung und bis 63 A“

Der VDE-Arbeitsausschuß „Fehlerrspannungs-Fehlerstrom-Schutzschalter“ der VDE-Kommission „Niederspannungsschaltgeräte“ hat unter Vorsitz von Landesoberbaurat *Schnell* den Entwurf der Leitsätze für Fehlerstrom-Schutzschalter ausgearbeitet. Damit wird zur Erfüllung der Bedingungen in VDE 0100/11.58 § 13 N auch von der Geräteseite her Rechnung getragen. Es ist beabsichtigt, diese Leitsätze am 1. Oktober 1961 in Kraft zu setzen.

Der Entwurf kann unter der Bezeichnung Entwurf 1 VDE 0664/...61 vom VDE-Verlag, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, zum Preise von 1,50 DM bezogen werden.

Einsprüche gegen den Entwurf sowie gegen den geplanten Termin für die Inkraftsetzung können bis zum 15. Juli 1961 bei der VDE-Vorschriftenstelle, Frankfurt a. M., Stresemannallee 21, eingereicht werden (doppelte Ausfertigung erbeten).

Der Kommissionsvorsitzende
Einsele

VDE-Vorschriftenstelle
Weise

Entwurf 2 zu VDE 0750 Teil 12/...61 „Vorschriften für elektromedizinische Geräte. Sondervorschriften für medizinische Röntgensätze.“

Zu dem in ETZ-A Bd. 80 (1959) S. 470 veröffentlichten Entwurf 1 zu VDE 0750 Teil 12/...59 sind Einsprüche eingegangen, die vom VDE/FNR-Gemeinschaftsausschuß ordnungsgemäß behandelt wurden. Der Ausschuß hat unter Vorsitz von Obering. *K. Bischoff* einen 2. Entwurf ausgearbeitet, der im Februar 1961 von der Kommission auf schriftlichem Wege genehmigt wurde. Es ist beabsichtigt, den Entwurf zum 1. September 1961 in Kraft zu setzen.

Der Entwurf kann unter der Bezeichnung Entwurf 2 zu VDE 0750 Teil 12/...61 vom VDE-Verlag, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, zum Preise von 2,40 DM bezogen werden.

Einsprüche gegen diesen Entwurf können bis zum 30. Juni 1961 der VDE-Vorschriftenstelle, Frankfurt a. M., Stresemannallee 21, eingereicht werden (doppelte Ausfertigung erbeten).

Der Kommissionsvorsitzende
Graf

VDE-Vorschriftenstelle
Weise

Entwurf VDE 0817/...61 „Vorschriften für Schlauchleitungen für Fernmeldeanlagen“

Der VDE-Arbeitsausschuß „Fernmeldeleitungen“ der VDE-Kommission „Kabel und Leitungen“ hat unter Vorsitz von Dipl.-Ing. *H. A. Lynen* die Vorschrift VDE 0817 dem Stand der Technik angepaßt.

Der Entwurf enthält nicht mehr die in Tafel 9 von VDE 0890 noch aufgeführten Schlauchleitungen mit Seidenisolierung und zugestrichen Schlauchleitungen mit Gummiisolierung. Die Schlauchleitungen mit Gummiisolierung der bisherigen Ausführungen GH I und GH II sind zu einer einzigen Ausführung GH, die der Ausführungen GHCH I und GHCH II zu der Ausführung GHCH zusammengefaßt worden. Neben diesen Schlauchleitungen mit Gummiisolierung wurden Schlauchleitungen mit Kunststoffisolierung neu aufgenommen.

Als Geltungsbeginn ist der 1. Januar 1962 vorgesehen. Für die Herstellung sollen daneben noch 6 Monate länger gelten:

die Vorschriften VDE 0817/4.56 und
die Teile von VDE 0890/7.57, die Schlauchleitungen für Fernmeldeanlagen behandeln.

Der Entwurf kann unter der Bezeichnung VDE 0817/...61 vom VDE-Verlag, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, zum Preise von 2,10 DM bezogen werden.

Einsprüche gegen den Entwurf sowie gegen die Termine für den Geltungsbeginn und das Ungültigwerden der bisherigen Bestimmungen können bis zum 15. Juni 1961 der VDE-Vorschriftenstelle, Frankfurt a. M., Stresemannallee 21, eingereicht werden (doppelte Ausfertigung erbeten).

Der Kommissionsvorsitzende
v. Wiarda

VDE-Vorschriftenstelle
Weise

Entwurf der Änderung VDE 0890 b/...61 der „Richtlinien für den Aufbau und die Verwendung isolierter Leitungen und Kabel für Fernmeldeanlagen“

Der VDE-Arbeitsausschuß „Fernmeldekabel“ der VDE-Kommission „Kabel und Leitungen“ hat unter Vorsitz von Dr. phil. *G. Reuschenbach* die in Tafel 20 von VDE 0890 angegebenen Wanddicken der Bleimäntel von Fernmeldekabeln dem Stand der Technik angepaßt.

Als Geltungsbeginn dieser Änderung ist der 1. Oktober 1961 vorgesehen. Für die Herstellung soll daneben noch der durch diese Änderung betroffene Teil der Tafel 20 von VDE 0890/7.57 (und VDE 0890/4.56) bis zum 31. März 1962 gelten.

Der Entwurf der Änderung kann unter der Bezeichnung VDE 0890 b/...61 vom VDE-Verlag, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, zum Preise von 0,30 DM bezogen werden.

Einsprüche gegen den Entwurf sowie gegen die Termine für den Geltungsbereich und das Ungültigwerden der bisherigen Angaben können bis zum 15. Juni 1961 der VDE-Vorschriftenstelle, Frankfurt a. M., Stresemannallee 21, eingereicht werden (doppelte Ausfertigung erbeten).

Der Kommissionsvorsitzende
v. Wiarda

VDE-Vorschriftenstelle
Weise

Zulassung einer Abweichung von VDE 0750 Teil 4/1. 59 „Sondervorschriften für die Zündung von Elektronenblitz- röhren bei Foto-Endoskopie mit Hochfrequenz- Zündimpulsen“

Auf Grund des in ETZ-A Bd. 80 (1959) Seite 314 bekanntgegebenen Verfahrens für die Zulassung von Abweichungen von VDE-Bestimmungen hat die VDE-Kommission 0750 „Elektromedizinische Geräte“ dem Antrag eines Herstellers zugestimmt, für die Zündung von Elektronenblitzröhren für Fotoendoskopie Hochfrequenz-Zündimpulse zuzulassen, wenn diese folgende Bedingungen erfüllen:

Die Spitzenspannung des HF-Zündimpulses darf 1 kV nicht übersteigen.

Die Frequenz des HF-Zündimpulses muß höher als 50 kHz sein. Die Zündimpulsdauer muß kleiner als 10^{-3} s sein.

Bei Einhaltung dieser Bedingungen wird die Spannung des HF-Zündimpulses bei der Auswahl der Prüfspannung nicht berücksichtigt.

Die Abweichung ist notwendig geworden, da die technische Entwicklung nach Inkraftsetzung der Änderung VDE 0750 Teil 4 a/1. 59 gezeigt hat, daß entgegen den seinerzeitigen Angaben der Blitzröhrenhersteller eine einwandfreie Zündung ohne Hochfrequenz-Zündimpuls nicht möglich ist.

Diese Ausnahme gilt bis zum Inkrafttreten einer Neufassung von VDE 0750 Teil 4, und zwar allgemein, d. h. nicht nur für den Antragsteller.

Für Foto-Blitz-Endoskopie-Geräte, die bis auf diese Abweichung VDE 0750 Teil 4/1. 59 entsprechen, erteilt die VDE-Prüfstelle gemäß ihrer Prüfordnung die Berechtigung zum Anbringen des VDE-Zeichens.

Der Kommissionsvorsitzende

Graf

VDE-Vorschriftenstelle

Weise

Ermächtigung zum Erteilen eines vorläufigen VDE-Verbands- zeichens für Leitungen nach VDE 0817/... 61 „Vorschriften für Schlauchleitungen für Fernmeldeanlagen“

Die VDE-Kommission „Kabel und Leitungen“ hat beschlossen, gemäß dem in ETZ-A Bd. 80 (1959) S. 314 bekanntgegebenen „Verfahren zur Erteilung vorläufiger VDE-Zeichengenehmigungen“ die VDE-Prüfstelle zu ermächtigen, vorläufige Genehmigungen zum Führen eines VDE-Verbandszeichens für Schlauchleitungen für Fernmeldeanlagen zu erteilen, die dem vorstehend angekündigten Entwurf VDE 0817/...61 entsprechen.

Der Kommissionsvorsitzende

v. Wiarda

VDE-Vorschriftenstelle

Weise

Erteilung vorläufiger VDE-Zeichengenehmigungen

Gemäß dem in ETZ-A Bd. 80 (1959) Seite 314 bekanntgegebenen Verfahren zur Erteilung vorläufiger Zeichengenehmigungen wird die VDE-Prüfstelle durch die VDE-Kommission „Installationsmaterial“ ermächtigt, vorläufige Zeichengenehmigungen zur Führung des VDE-Zeichens auf Grund des Entwurfes VDE 0620 k/...61 zu erteilen.

Ein Hinweis auf den Entwurf VDE 0620 k/...61 ist auf S. 261 dieses Heftes veröffentlicht.

Der Kommissionsvorsitzende

Lindner

VDE-Vorschriftenstelle

Weise

VDE-Verlag GmbH

Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33

Neu erschienen sind:

VDE-Vorschriftenbuch

Band I (Gruppe 0 und 1) 27. Aufl., nach dem Stande vom 1. 3. 1961 20,— DM

Band II (Gruppe 2 bis 4) 27. Aufl., 2. erw. Ausgabe, nach dem Stande vom 1. 3. 1961 25,— DM

VDE-Buchreihe

Band 7 Halbleiter-Bauelemente in der Meßtechnik.

12 Vorträge der Tagungen der VDE/VDI-Fachgruppe „Elektrisches und wärmetechnisches Messen“ in Krefeld im März 1960 und in Mannheim im Mai 1960. Gr.-8°, 213 S., 187 B., Kunst-
druckpapier, Halbleinen 18,— DM

Folgende Gesamtfassungen liegen vor:

VDE 0550 Teil 3/3. 61 (enthält die Änderung a)

Vorschriften für Kleintransformatoren Teil 3 Sondervorschriften für Trenn-, Isolier- und Netzanschlußtransformatoren sowie für sonstige Transformatoren mit getrennten Wicklungen —,70 DM

VDE 0632/12. 60 (enthält die Änderung i)

Vorschriften für Schalter bis 750 V 60 A 2,— DM

VDE 0668/8. 60 (enthält die Änderung b)

Vorschriften für Elektrozaun-Geräte mit Batteriebetrieb 1,40 DM

VDE 0712 Teil 6/8. 60 (enthält die Änderung b)

Vorschriften für Zubehör für Leuchtstofflampen und Leuchtstoffröhren mit Nennspannungen unter 1000 V
Teil 6 Sondervorschriften für Lampen- und Starterfassungen —,60 DM

Englische Übersetzungen

VDE 0871/11. 60 (engl.)

Limits of Radio Interference from Radio Frequency Apparatus and Installations (Specifications) 2,40 DM

VDE 0875/12. 59 (engl.)

Rules for the Radio Interference Suppression for Appliances, Machines, and Installations (except Radio Frequency Apparatus as well as Motor Vehicles and Machine Sets equipped with Internal-combustion (Engines) 2,40 DM

Mitteilungen der VDE-Bezirksvereine

Tagung „Halbleiter in der Energie- und Steuerungstechnik“

Der Elektrotechnische Verein (ETV) Württemberg veranstaltet am 20. und 21. April 1961 in Stuttgart eine Halbleitertagung über das Thema „Halbleiter in der Energie- und Steuerungstechnik“. Die Vorträge finden im Vortragssaal der Technischen Werke der Stadt Stuttgart, Lautenschlagerstraße 21, statt.

Vortragsfolge

Donnerstag, den 20. April 1961, Beginn 9 h:

Prof. Dr.-Ing. Dosse, Stuttgart: „Physikalische Grundlagen“,
Dr. E. Arends, Beleck: „Der Halbleiter als Schaltelement“,
Dipl.-Phys. G. Kliesch, Erlangen: „Der Silizium-Gleichrichter in Anlagen und Geräten“,
Dr. Kessler, Erlangen: „Der Halbleiter in digitalen Steuerungen“.

Freitag, den 21. April 1961, Beginn 9 h:

Dr.-Ing. E. Krochmann, Berlin: „Die Halbleiter in der analogen und digitalen Regelungstechnik und Datenverarbeitung“,
Dipl.-Ing. V. Kussl, Mannheim: „Automatisierung von Fertigungseinrichtungen unter Verwendung des Halbleiters“,
Dr. Poganski, Frankfurt: „Theorie und Entwicklungsstand der elektrothermischen Kälteerzeugung“.

Interessenten werden gebeten, Vortragsprogramme bei der Geschäftsstelle des ETV Württemberg, Stuttgart, Lautenschlagerstraße 21, anzufordern.

VERANSTALTUNGSKALENDER

Amberg: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Zweigstelle Amberg, Haselmühlstr. 50.

12. 4. 1961, 20.00, SSW-Gerätewerk, Haselmühlstr. 50: „Licht, Körperfarbe und Farbwahrnehmung“, Dipl.-Ing. Lorenz, Erlangen.

Bayreuth: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Zweigstelle Bayreuth, Alexanderstr. 11–13.

14. 4. 1961, 20.00, BELG, Hörsaal, Kanalstr. 2: „Ingenieuraufgaben an Energieverteilungsnetzen in Übersee“, H. Hage, Erlangen.

Biberach: ETV Württemberg, Zweigstelle Biberach, i. Hs. Energieversorgung Schwaben.

11. 4. 1961, 17.00, Energieversorgung Schwaben, Vortragssaal, Bahnhofstraße 19: „Prinzip der Radartechnik und deren Anwendung nach dem neuesten Stand“, Dipl.-Ing. W. Gerlitzki, Ulm.

Bielefeld: VDE-Bezirk Westfalen-Ost, Zweigstelle Bielefeld, Kavalleriestr. 26.

20. 4. 1961, 18.00, Haus der Technik, Vortragssaal, Jahnplatz 5: „Der Film als Mittel zur Darstellung technischer Vorgänge“, Oberpoststr. G. Goebel, Darmstadt.

Erlangen: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Zweigstelle Erlangen, Nägelsbachstr. 25.

27. 4. 1961, 19.30, Universität, Physikalisches Institut, großer Hörsaal, Glückstr. 6: „Ingenieuraufgaben an Energieverteilungsnetzen in Übersee“, H. Hage, Erlangen.

Essen: ETV des Rheinisch-Westfälischen Industriebezirks Essen, Hagen/Westf., Körnerstr. 40.

11. 4. 1961, 16.30, Haus der Technik, Essen, Hörsaal B: „Grundgedanken und Probleme der Regelung“, Dipl.-Ing. J. Janzing, Aachen.

Frankfurt: VDE-Bezirksverein Frankfurt, Rothschildallee 33.

25. 4. 1961, 17.30, Hörsaal für Angewandte Physik, Robert-Mayer-Str. 2: „Gießharzisierte Schaltanlagen mit sehr kleinem Raumbedarf“, Prof. Dr.-Ing. P. Brückner, Ratingen.

9. 5. 1961, 17.30, Hörsaal für Angewandte Physik, Robert-Mayer-Str. 2: Farbton-Filmvorführung mit Einführung durch Dipl.-Ing. Johannsen: „Form und Funktion — 50 Jahre industrielle Formgestaltung“, anschließend Mitgliederversammlung und Wahl des Vorstandes.

Gießen: VDE-Bezirksverein Frankfurt, Zweigstelle Gießen, Schanzenstr. 3.

18. 4. 1961, 19.00, Physikalisches Institut, Stephanstr. 24: „Entwicklung der Industriebeleuchtung, ihr heutiger Stand“, Obering. L. Weiß, Erlangen.

Hamburg: VDE-Bezirk Hamburg, Gerhart-Hauptmann-Platz 48.

20. 4. 1961, 17.30, Museum für Völkerkunde, großer Vortragssaal, Rothenbaumchaussee 64: „Das Hamburger Elektronen-Synchrotron“, Dir. Prof. Dr. W. Jentschke, Hamburg.

Hannover: ETG Hannover, Bischofsholer Damm 70.

18. 4. 1961, 18.15, Technische Hochschule, Hörsaal 42: „Kontaktlose Steuerungstechnik für die industrielle Anwendung“, Dipl.-Ing. G. Fröhr, Erlangen.

Heilbronn: ETV Württemberg, Zweigstelle Heilbronn, Allee 20, Elektrizitätswerk.

11. 4. 1961, 20.00, Festhalle Harmonie, kleiner Saal: „Die Kraftwerks-Treppe am Neckar“, Betriebsleiter Ing. Holdermann, Gundelsheim.

Kiel: VDE-Bezirk Schleswig-Holstein, Kiel, Gartenstr. 6.

11. 4. 1961, 17.30, Schleswig-Holsteinische Landesbrandkasse, großer Saal, Gartenstr. 4: „Stand der heutigen Kabeltechnik“, Ing. Wellhausen, Erlangen.

18. 4. 1961, 17.30, Schleswig-Holsteinische Landesbrandkasse, kleiner Saal, Gartenstr. 4: „Hochspannungs-Schaltanlagenbau und die neuen Errichtungsvorschriften VDE 0101“, Dir. B. Fleck, Frankfurt a. M.

Köln: VDE-Bezirk Köln, Köln-Riehl, Amsterdamer Str. 192.

28. 4. 1961, 18.00, Staatliche Ingenieurschule, Ubiering 48: „Moderne Raumschutztechnik“, Dr. A. Rechten, München.

München: ETV München, München 8, Rosenheimer Str. 5.

10. 4. 1961, 18.00, Deutsches Museum, Vortragssaal 2: „Hochspannungs-Isolatoren aus Gießharz“, E. Hartmann.

17. 4. 1961, 18.00, Deutsches Museum, Vortragssaal 2: „Die Übertragung von Daten bei weitverbreiteten elektronischen Buchungsanlagen“, Dipl.-Phys. J. Lösch, Stuttgart.

Münster: ETV des Rheinisch-Westfälischen Industriebezirks Essen, Zweigstelle Münster, Herwarthstr. 6-8.

20. 4. 1961, 19.30, Staatliche Ingenieurschule für Bauwesen, Physiksaal, Eingang Lotharingerstr.: „Anwendungsmöglichkeiten der elektrothermischen Kälteerzeugung“, Dr. G. Haacke, Frankfurt a. M.

Nürnberg: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Harmoniestr. 27.

11. 4. 1961, 19.30, Hochhaus am Plärrer, Südliche Fürther Str. 1: „Elektrotechnische Eigenbedarfsschaltungen in Dampfkraftwerken“, Dipl.-Ing. W. Wartenberg, Frankfurt a. M.

18. 4. 1961, 19.30, Ohm-Polytechnikum, Hörsaal 107, Keßlerstr. 40: „Höchstleistungstransformatoren“, Obering. Dr.-Ing. W. Dietrich, Nürnberg.

25. 4. 1961, 19.30, Germanisches Nationalmuseum, Vortragssaal, Kartäusergasse 7: „Die analoge und digitale Programmierung als wichtige Voraussetzung der Automatisierung“, Dipl.-Phys. H. Cordes, Mannheim.

Regensburg: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Zweigstelle Regensburg, Einhausstr. 9.

21. 4. 1961, 20.00, Ingenieurschule, Prüfenigerstr. 58: „Psychologische Probleme der Zusammenarbeit“, Dr. Wiedemann, Erlangen.

Stuttgart: ETV Württemberg, Stuttgart N, Lautenschlagerstr. 21.

13. 4. 1961, 17.15, Technische Hochschule, Elektrotechnisches Institut, Breitscheidstr. 3: „Luftkabel für Fernsprechzwecke“, Ing. P. Tümsmeyer, Köln.

27. 4. 1961, 17.30, Technische Hochschule, Elektrotechnisches Institut, Breitscheidstr. 3: „Probleme der Flugsicherung“, Dr. Kramar, Stuttgart.

Ulm: ETV Württemberg, Zweigstelle Ulm, Elisabethenstr. 3.

20. 4. 1961, 20.00, Handwerkskammer, großer Saal, Olgastr. 72: „Die Gasturbine in der Energieversorgung“, Dipl.-Ing. Weber, Mannheim.

Würzburg: VDE-Bezirksverein Nordbayern, Zweigstelle Würzburg, Sterenstr. 1.

10. 4. 1961, 18.00, UWU, Vortragssaal „Elektroberatung“, Kaiserstr. 29: „Fehlerstrom-Schutzschaltung, Wirkungsweise und spezielle Eigenschaften im Rahmen der Schutzmaßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannung“, Dr.-Ing. G. Clewert, Erlangen.

17. 4. 1961, 18.00, Balthasar-Neumann-Polytechnikum, Sanderring 8: „Neuzeitliche Straßenbeleuchtung im modernen Stadtbild“, Dipl.-Phys. G. Smiatek, Erlangen.

Essen: Haus der Technik, Essen, Hollestr. 1.

13. 4. 1961, 17.00, Haus der Technik, Hörsaal B: „Konstruktion, Fertigung und Montage eines Kernreaktors“, Dipl.-Ing. W. Liebig, Zweibrücken.

19. 4. 1961, 17.00—18.30, Kursus, 10 Doppelstunden, Haus der Technik, Hörsaal C: „Regelungstechnik — Teil I“, Baurat Dipl.-Phys. K. H. Müller-Ihlbrook, Essen.

PERSÖNLICHES

F.-J. Fischer. — Die Technische Universität Berlin ernannte am 17. Februar 1961 *Franz Joseph Fischer* zum Doktor-Ingenieur Ehren halber. Hiermit wurden von wissenschaftlicher Seite die Verdienste des in Fachkreisen bekannten Konstrukteurs gewürdigt.

F.-J. Fischer, der am 30. Januar d. J. seinen 70. Geburtstag feierte, trat 1910 bei der Firma Koch & Sterzel in Dresden ein und nahm bald auf die technische Entwicklung maßgebenden Einfluß. Auf seine Erfindungsgabe geht eine große Anzahl von Neuerungen zurück, die heute zum Allgemeingut der Elektrotechnik des In- und Auslandes gehören. Anlässlich der Ehrenpromotion wurden hiervon besonders hervorgehoben:

Die Weiterentwicklung der Hochspannungs-Kaskaden-Transformatoren zu brauchbaren Prüftransformatoren. Eine Sonderausführung dieser Transformatorengattung stellt der Isoliermantel-Transformator dar, der heute noch als Prüftransformator und in umgekehrter Anordnung als Kaskaden-Spannungswandler in Verteilungsanlagen hoher Reihenspannung allgemein Anwendung findet.

Ferner geht auf *F.-J. Fischer* die Erfindung und Durchentwicklung des Schub-Transformators zurück. Der Schub-Transformator, der 1920 entstand, ermöglichte die stufenlose Regelung elektrischer Energie für Leistungen bis 1000 kVA auf transformatorischer Grundlage.

Der größte erfinderische Erfolg wurde *F.-J. Fischer* durch die von ihm in den Jahren 1919 bis 1921 geschaffenen Querloch-Durchführungs- und Querloch-Topf-Stromwandler zuteil. Diese Konstruktionen förderten den Sicherheitsgrad der Schaltstationen, indem sie für die Stromwandler-Isolation Öl- oder Verguß-Isolation vermieden und statt dessen den einteiligen nicht brennbaren Porzellan-Isolierkörper mit Querloch einführten. Viele Länder übernahmen diese Konstruktion.

F.-J. Fischers Leistungen wurden schon in seinen jungen Jahren von Erfolg gekrönt. In den Vorstand seiner Firma berufen, trug er zu deren Ausbau und Ansehen wesentlich bei. Viele Fachkollegen lernten seine tatkräftige und zielstrebige Mitarbeit in den VDE- und Normungs-Ausschüssen sowie in den technischen Ausschüssen der Wirtschaft kennen und schätzen.

Von 1946 bis 1951 wurde *F.-J. Fischer* als Spezialist nach Rußland verpflichtet. Nach seiner Rückkehr stellte er wieder seine Arbeitskraft der inzwischen nach Essen übersiedelten Firma Koch & Sterzel zur Verfügung. Seit Januar 1959 ist *F.-J. Fischer* im Ruhestand, stellt jedoch seine reichen Erfahrungen weiterhin beratend zur Verfügung.

O. E. Nölke



BÜCHER

DK 621.331.3.024/07

Gleichstrombahnen und Gleichstromfahrzeuge. Stand und Entwicklungsrichtungen. VDE-Buchreihe Bd. 6. Mit 200 S., zahlr. B. und Taf., Format 17,5 cm × 24,5 cm. Hrsg. Wissenschaftlicher Ausschuß des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE). VDE-Verlag GmbH, Berlin 1960. Preis Halbln. 28,— DM.

Das Buch enthält die Vorträge, die auf der vom Wissenschaftlichen Ausschuß des VDE in Hannover veranstalteten Fachtagung über Gleichstromtriebfahrzeuge für den Fahrdrahtbetrieb, Batteriefahrzeuge und die Stromversorgung von Gleichstrombahnen sowie die Ladetechnik der Batteriefahrzeuge gehalten wurden. Der Leiter der Fachgruppe „Elektrische Bahnen“ des Wissenschaftlichen Ausschusses, Bundesbahndirektor Professor Dr.-Ing. *Knüttler*, berichtet in seinem Vorwort über die Gründe, die zu der Tagung und den gewählten Themen Veranlassung gaben.

In seinem Vortrag über Lokomotiven und Triebwagen für Industrie- und Fernbahnen stellt *K. Hilsenbeck* verschiedene Gesichtspunkte heraus, nach denen er eine Reihe von Beispielen ausgeführter Fahrzeuge bespricht. Es sind dies die Verbesserung der Steuerfähigkeit, die Verminderung des spezifischen Leistungsgewichtes, Erhöhung der Geschwindigkeit, Ausnutzung des Haftwertes, automatische Anfahrt, Problem der Universallokomotive, Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Einsparung bei der Unterhaltung.

H. Hoppe hatte die Triebwagen für Nahverkehrs- und Straßenbahnen als Thema gewählt. Zusammenfassend kommt er zu dem Ergebnis, daß die Entwicklung des wagenbaulichen Teiles — zumindest in Stahlleichtbauweise — einen gewissen Abschluß gefunden hat, während die Fortschritte der Halbleitertechnik für den elektrischen Teil künftige Bedeutung erhalten werden.

In seinen Ausführungen über die Gleichstrom-Bahnmotoren behandelt *K. Töfflinger* die Anforderungen, die an diesen Motor als Sondermaschine gestellt werden und für seine Berechnung und den Entwurf maßgebend sind. Die Strombelastung ist beim Anfahren am größten, die Spannungsbeanspruchung, die Rundfeuergefahr dagegen bei den höchsten Drehzahlen, dem kleinsten Erregergrad, bei Schaltvorgängen und beim Bremsen. Die Beziehungen zwischen Kommutator und Bürste sowie Geräuschfragen werden außerdem herausgestellt.

A. Selbach hat seine Arbeit den Schaltungen und Steuerungen für Gleichstrom-Triebfahrzeuge gewidmet. Wie erwartet, behandelt der Verfasser auch die elektronischen Bauelemente, die als kontaktlose Regelglieder oder Schalter zunehmend in der Starkstromtechnik verwendet werden. Jedoch sind noch keine Anzeichen vorhanden, daß diese Elemente in absehbarer Zeit den Gleichstrom-Triebfahrzeugen eine ähnlich verlustarme Anfahrt ermöglichen können, wie dies beim Wechselstrom-Triebfahrzeug durch den Stufentransformator der Fall ist.

Die Bedeutung der Batteriefahrzeuge auf dem Gleichstromsektor der elektrischen Traktion kommt in den weiteren fünf Abschnitten des Buches zum Ausdruck. *H. Bode* berichtet über die Fahrzeugbatterie, ihre spezifische Kapazität in Amperestunden je Kilogramm, Lebensdauer, Wartung, Ladezeiten und Kosten.

G. Wilke zeigt die Grenzen zwischen Fahrdraht- und Batteriebetrieb für Gleichstromfahrzeuge. Er gibt den Akkumulatortriebwagen die Aussicht, auch im Bezirksverkehr mit 120 km/h Höchstgeschwindigkeit und guter Wirtschaftlichkeit Verwendung zu finden. Für eine fernere Zukunft sieht er in einer auf das Speicherprinzip gerichteten Entwicklung von Brennstoffelementen neue Wege.

E. Kodinger behandelt die Flurförder- und Straßenfahrzeuge als wichtiges Hilfsmittel zur Rationalisierung des innerbetrieblichen Materialflusses.

Ein zweiter Beitrag von *K. Töfflinger* befaßt sich mit den besonderen Anforderungen an die Motoren für Akkumulator-Triebfahrzeuge. Da die meisten Verluste in den Anfahrwiderständen entstehen, kommt es darauf an, den Geschwindigkeitsbereich, in dem man ohne die Widerstände fahren kann, zu verbreitern, d. h. den Teil mit Feldschwächung zu erweitern. Dies führt zu kompensierten Motoren.

In dem weiteren Abschnitt folgen die Sonderheiten bei Schaltung und Steuerung für Akkumulatorfahrzeuge. Sie stammen auch hier aus der Feder von *A. Selbach*.

Das Kapitel über die Stromversorgung der Bahnen und Fahrzeuge enthält drei Beiträge. In dem ersten von *L. Hartmann* wird

der Silizium-Gleichrichter in der Bahnstromversorgung besprochen. Mit der Verwendung dieser Gleichrichter kündigt sich ein noch größeres Maß von Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit der Stromversorgungsanlagen für Gleichstrombahnen an, als es schon bisher vorhanden war.

K. Kettner befaßt sich mit der Ausrüstung und Schaltung der Bahnstrom-Unterwerke, den Schutzeinrichtungen, der Streckenprüfung und Erdung. Er gibt einige Beispiele ausgeführter Anlagen.

Im letzten Abschnitt des Buches über Ladetechnik und Ladeanlagen für Batteriefahrzeuge von *F. Korb* werden die Möglichkeiten der Ausführungen von Ladeanlagen mit gesteuerten und ungesteuerten Ventilen sowie die Regler für die Ladegeräte und die für den Ladevorgang charakteristischen Größen behandelt.

Wie schon die überraschend gute Beteiligung an der Fachtagung gezeigt hat, war das Interesse an diesen besonderen Fragen der Elektrotechnik recht groß. Ich bin überzeugt, daß auch das Buch auf Grund seines Inhaltes einen dankbaren Leserkreis finden wird.

A. Peters

DK 621.3.025/07

Wechselstrom. Kleines Lehrbuch der Elektrotechnik. Bd. 2. Von G. K. M. *Pfeistorf* und J. *Siebert*. 2. Aufl. Mit 122 S., 146 B., Format 15,5 cm × 22 cm. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1960. Preis kart. 5,90 DM.

Das Buch ist der zweite Band einer Reihe „Kleines Lehrbuch der Elektrotechnik“ und liegt in der zweiten Auflage vor. Wie die übrigen Bände enthält es Grundlagen der Elektrotechnik in Gestalt einer gedrängten Niederschrift einer Vorlesung über Wechselströme. Dabei sind den meisten Abschnitten auch Versuche beigegeben, wie sie in der Vorlesung oder in einem Praktikum ausgeführt werden können. Behandelt werden die Grundbegriffe, einfache Wechselstromkreise, der Transformator, das Drehstromsystem und die Wirkungsweise der Wechsel- und Drehstrommaschinen. Die Versuche führen gleichzeitig in die Wechselstrom-Meßtechnik ein. Der mathematische Aufwand ist niedrig gehalten, was der Anschaulichkeit zugute kommt. Auf klare Formelbezeichnungen und konsequente Anwendung des MKSA-Systems haben die Verfasser Wert gelegt. So wird das wohlfeile Buch ein nützlicher Helfer für Studierende der Hoch- und Fachschulen sein.

G. Frühauf

DK 536.7(07)

Einführung in die Technische Thermodynamik und in die Grundlagen der chemischen Thermodynamik. Von E. *Schmidt*. 8. verb. Aufl. Mit 563 S., 244 B., 72 Taf., Format 16 cm × 24 cm. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1960. Preis Ganzln. 33,— DM.

Ein Lehrbuch der Thermodynamik, das alle zwei Jahre neu aufgelegt werden muß, bedarf keiner besonderen Empfehlung. Diese achte Auflage ist gegen die siebente (1958) nur wenig verändert. Neu hinzugekommen sind Betrachtungen über den Plasmazustand und die Erreichung höchster Temperaturen durch Lichtbogen, Stoßwellenrohr und Kernreaktionen.

Seit der ersten Auflage hat der Verfasser konsequent Größengleichungen benutzt und alle Fortschritte der Größenlehre sofort angewendet. So ist das mechanische Wärmeäquivalent schon seit der 2. Auflage (1944) als überflüssig weggelassen, und seit der 7. Auflage (1958) sind die spezifischen Größen auf die Masse bezogen, so daß die Fallbeschleunigung nur noch in solchen Gleichungen auftritt, in die sie aus physikalischen Gründen hineingehört. Bei einem solchen Vorgehen gibt es praktisch kein Einheitenproblem, da Größengleichungen für beliebige (auch nichtkohärente) Einheiten gültig bleiben. So würde die Umstellung auf Einheiten des Internationalen Einheitensystems (Joule, N/m² oder bar) nur die Rechenbeispiele und Tafeln betreffen. Daß die technische Krafteinheit mit Kilopond (kp) und nicht mehr mit Kilogramm (kg) bezeichnet ist, dürfte nach dem Gesagten selbstverständlich sein.

So ist die „Technische Thermodynamik“ von E. *Schmidt* auch in diesen formalen Dingen vorbildlich. Sie ist das z. Z. umfassendste und gründlichste Werk dieses Gebietes in deutscher Sprache, ein Lehrbuch für den Studierenden und ein Nachschlagewerk für den Praktiker, der es bei seiner Berufsarbeit mit Fragen der Wärmelehre zu tun hat.

U. Grigull

Folgende Aufsätze erschienen in der ETZ-B vom 3. April 1961

Heft 7

Die Einweihung des VDE-Hauses in Frankfurt a. M.

H. *Flöth* u. G. *Leonhardt*: Gießharzisierte Mittelspannungs-Schaltanlagen mit sehr kleinem Raumbedarf.

Abschluß des Heftes 28. März 1961

Schluß des Textteiles

Schriftleitung: Frankfurt a. M. S 10, Stresemannallee 21; Fernruf 60 341, Fernschreiber (Telex) 04-12 871.

Hauptschriftleiter: Dr.-Ing. *P. Jacotet* (für den redaktionellen Teil verantwortlich).Schriftleiter: Dipl.-Ing. *F. Meske* und Dipl.-Ing. *K. Rangs*.

Zuschriften für die Schriftleitung nicht an eine persönliche Anschrift, sondern nur an: Schriftleitung der ETZ, Frankfurt a. M. S 10, Stresemannallee 21.

Verlag und Anzeigenverwaltung: VDE-Verlag GmbH, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, Fernruf 34 01 41, Fernschreiber (Telex) 01-84 083.

Anzeigenleitung: *Kurt Totzauer*.

Bezugspreis (halbjährlich zuzügl. Zustellgebühr) 24,— DM, für VDE-Mitglieder - nur durch den VDE-Verlag - 16,— DM;

Ausgabe A und B zusammen 34,— DM,

für VDE-Mitglieder - nur durch den VDE-Verlag - 24,— DM.

Einzelpreis dieses Heftes 2,— DM.

Druck: Deutsche Zentraldruckerei AG, Berlin SW 61, Dessauer Straße 6/7.